



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE BASADOS EN  
TECNOLOGÍA AUTÓNOMA EN MINERA ESCONDIDA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**JUAN PABLO AHUMADA OPPICI**

**PROFESOR GUÍA**  
**NELSON MORALES VARELA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**  
**MARÍA JOSÉ YRARRAZAVAL HERRERA**  
**JORGE PALMA VILLAGRÁN**

**SANTIAGO DE CHILE**  
**2018**

## RESUMEN

Los desafíos en la industria minera actual buscan conseguir operaciones más seguras y eficientes, de manera de obtener mayores beneficios de sus activos. En lo que respecta a minería a cielo abierto, una de las innovaciones más relevantes es la utilización de tecnologías autónomas de transporte de materiales. Las implementaciones de esta tecnología son recientes y aún limitadas en número, por lo que la cantidad de información técnica disponible es reducida en muchos aspectos. Los camiones autónomos pueden significar un ahorro en el costo de operación dado por: una mayor vida útil de neumáticos, uso más eficiente de combustible por mayor consistencia del sistema, reducción de cantidad de operadores y menores costos de mantenimiento por mayor durabilidad de componentes.

El equipo de Planificación a Largo Plazo de Minera Escondida, como parte de su plan integral de desarrollo futuro, está evaluando proyectos de automatización para los depósitos de los cuales extrae mineral. Este estudio se enfoca en realizar un análisis de cómo incorporar esta tecnología a la operación de los rajos Escondida y Escondida Norte, y evaluar estos casos a través de simulaciones de eventos discretos en el *software* DSim. Se trata de eventos a futuro, por lo que inicialmente se modela cada caso con las condiciones actuales de la faena y luego se incorporan los camiones autónomos. La comparación se realiza a partir de resultados del simulador en productividad total mina y KPI de camiones.

Para realizar este estudio, se debe considerar una restricción propia de los sistemas autónomos actuales que tienen una cantidad de equipos definida que pueden tener trabajando simultáneamente y que, por lo tanto, en operaciones grandes, como lo es el caso de Minera Escondida, se deben desacoplar los sistemas analizados. Se tienen los resultados que se presentan a continuación.

Escondida Norte es un sistema aislable para aplicar flotas de camiones autónomos con vías exclusivas. El caso con autonomía ofrece una producción simulada cercana a lo que es la del caso base con camiones manuales (94.1% vs 95.7% respectivamente de cumplimiento promedio de material a transportar planificado diario). La utilización de equipos autónomos en promedio llega al 85.7%, lo cual constituye una mejora en 3 puntos porcentuales con respecto al caso con camiones manuales. Teniendo en cuenta las virtudes de la integración de esta nueva tecnología, se considera que es una oportunidad que se debe tener en mente para realizar análisis de costos con mayor detalle.

Escondida debe ser dividido en dos sistemas con rutas y destinos exclusivos para implementar esta tecnología. Este rajo es un sistema complejo y altamente interrelacionado, lo que dificulta la zonificación. Se analizaron dos posibles sistemas independientes: S4 & N17 y P11, P11s & N18. Los resultados de las simulaciones indican que la mejor propuesta es S4 & N17 autónomo ya que se obtienen cumplimientos mayores del tonelaje transportado diario (94% vs 93.6% del sistema P11, P11s & N18 autónomo). Aun así, la diferencia de producción con el caso base (camiones manuales) es importante (1.8% de cumplimiento que, por la gran envergadura de Escondida, resulta en ~5.6 millones de toneladas anuales menos transportadas). Otro punto destacable es que se obtienen utilidades relativamente bajas en comparación a lo esperado (79.5% para la zona manual y 81.2% para la autónoma) que se deben a las restricciones propias del sistema y la menor flexibilidad en la asignación dinámica de camiones. En este caso, se requieren estudios más profundos que indiquen la posibilidad de realizar los cambios al *layout* propuestos y los costos que implicarían.

Como recomendación para estudios posteriores, una vez que se analice la factibilidad de los cambios al *layout* y cuantifique los costos asociados, se deben nuevamente realizar simulaciones para revisar los resultados que posibles modificaciones puedan tener en la operación.

## ABSTRACT

The challenges in the current mining industry seek to achieve safer and more efficient operations to obtain greater benefits from their assets. Regarding open pit mining, one of the most relevant innovations is the use of autonomous materials haulage technologies. The implementations of this technology are recent and scarce, so the amount of technical information available is insufficient in many aspects and, if exists, is only provided by suppliers.

Minera Escondida's Long Term Mine Planning team, as part of its strategic plan for future development, is evaluating automation projects for the deposits from which ore is extracted. This study focuses on analyzing how autonomous haulage trucks could be incorporated into the current operation of Minera Escondida and evaluate these cases through discrete event simulations in DSim. These are future events, so each case is initially modeled with the current conditions of the mining operation and then the autonomous trucks are incorporated. The comparison is made from simulator results in total mine productivity and truck KPI.

To carry out this study, the current autonomous systems were considered to have a defined amount of trucks that can be working simultaneously and that, therefore, in large operations, such as the case of Minera Escondida, should consider decoupling the analyzed systems.

Escondida Norte is an easily isolable system to apply fleets of autonomous haulage trucks with exclusive routes. The case with autonomy presents a simulated production close to the one obtained in the base case with manual trucks (94.1% vs. 95.7% average compliance of the diary planned production, respectively). The utilization of autonomous equipment on average reaches 85.7%, which is an improvement in 3 percentage points with respect to the case with manual trucks and which translates into 1.3 additional effective operational hours. Contemplating the virtues of the integration of this new technology, it is considered that this is an opportunity that must be taken into mind to perform cost analysis in greater detail.

Escondida must be divided into two independent systems with exclusive routes and destinations to implement this technology. However, this pit is a complex and highly interrelated system which makes zoning difficult. Two possible independent systems were analyzed: S4 & N17 and P11, P11s & N18. The results of the simulations indicate that the best proposal is S4 & N17 autonomous since greater compliances of the transported diary tonnage are obtained (94% vs 93.6% of the system P11, P11s & N18 autonomous). Even so, the difference in production compared to the simulated base case (manual trucks) is important (1.8% compliance, which due to the large size of Escondida results in ~5.6 million tons less produced per year). Another point that should be emphasized, is that the simulations achieve relatively low utilizations for both technologies compared to what was expected (79.5% for the manual zone and 81.2% for the autonomous zone), which are due to the system's own restrictions and the lower flexibility of the dynamic truck allocation. In this case, deeper studies should be carried out to assess the possibility of making the proposed changes to the layout and the costs that would be involved.

As a recommendation for further studies, once the feasibility of the changes to the layout is analyzed and the associated costs are quantified, simulations should be carried out again to review the results that possible modifications may have in the operation.

A mis papás y familia,  
por cada día confiar y creer en mí.  
A mis amigos,  
por las experiencias compartidas.

*“And so, does the destination matter? Or is it the path we take? I declare that no accomplishment has substance nearly as great as the road used to achieve it. We are not creatures of destinations. It is the journey that shapes us. Our callused feet, our backs strong from carrying the weight of our travels, our eyes open with the fresh delight of experiences lived.”*

— Brandon Sanderson, *The Way of Kings* —

*"It's almost unbearable, isn't it... the pain of being all alone. I know that feeling, I've been there, in that dark and lonely place, but now there are others, other people who mean a lot to me. I care more about them than I do myself, and I won't let anyone hurt them. That's why I'll never give up, I will stop you, even if I have to kill you! It's because they saved me from myself, they rescued me from my loneliness, they were the first to accept me as who I am. They're my friends."*

— Naruto Uzumaki —

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis papás por siempre impulsarme a descubrir y alcanzar mis sueños, por darme el primer empujón que muchas veces he necesitado en cada comienzo y por estar ahí para conmigo hasta el fin de las etapas que he recorrido en mi vida.

A mis hermanas, porque a pesar de las discusiones, han estado ahí siempre que lo pido, sin importar la razón.

Ai miei nonni, por su cariño y compañía en todas. A mi nonno por su disposición a ayudarnos a buscar información, alentarnos a vivir nuevas experiencias y sus enseñanzas que llevaré conmigo eternamente. A mi nonna, sin la cual me hubiese sido imposible seguir adelante en cada escalón que se interpuso en mi carrera, por su constante preocupación y que, sin sus galletas y café, las tardes de estudio hubiesen resultado más arduas.

A la familia Ahumada Mardones, por su confianza en que todo se puede lograr poniendo esfuerzo y dedicación. A mi abuela, por siempre esperar lo mejor de mí. A mis tíos y primos, por su permanente apoyo y afecto, que ayudaron a relajar mi mente en períodos de stress.

A la familia Oppici Soriani, porque a pesar de las barreras geográficas, nunca han estado ausentes. A mi tío Fabio, que siempre ha mostrado interés por todas las decisiones que tomamos. A mi tía Lalli, por compartir la alegría de cada logro que alcanzamos.

A mis amigos de toda la carrera, Sebastian e Ignacio, porque han sido un pilar base de toda mi vida universitaria, nunca perdieron su fe en mí y siempre sé que puedo contar con su consejo.

A mis amigos de plan común, Sergio, Fabián y Paolo, por las risas que compartimos durante las jornadas de estudio para las primeras evaluaciones.

A mis amigos mineros, Héctor, Selma, Oscar, Felipe, Stefano y Ada, por las tonteras de las cuales hablamos, por las alegrías que hemos compartido y por ser un grupo genial.

A las personas del laboratorio Delphos, porque me recibieron con los brazos abiertos y en los cuales me apoyé para el desarrollo de la memoria. A mis compañeros memoristas Ada y Raúl, a mis sempai Manuel, Javier, Sergio, Pedro, Valentina y Héctor, a los desarrolladores de DSim, especialmente a Consuelo, por la buena onda y disposición a ayudar.

A mis amigos del intercambio a McGill University, por hacerme conocer nuevas experiencias, compartir culturas y ser mi familia durante mi estadía en Canadá.

A los profesores de la carrera, por su deseo de que la Escuela avance y crezca. A Aldo Casali, por su invitación a estudiar Ingeniería Civil de Minas y apoyo durante la carrera.

A los profesores integrantes de la comisión, Nelson, María José y Jorge, por su tiempo y consejos para mejorar este proyecto.

A las secretarias docentes Nicole, Carol y Juanita, por su entrega a los alumnos.

A Patricia Lara, por su cariño, confianza y apoyo en los últimos años de la carrera.

A la familia Molfino Tapia, por su amistad y cercanía con la que siempre me han tratado.

A Verónica Pulquillanca, por su amabilidad y sus comidas que me llenaron de energía para continuar trabajando.

Al equipo de Planificación Minera a Largo Plazo de Minera Escondida Ltda. por sus tallas buena onda, enseñarme de planificación, proponer el tema de memoria y colaborar para llevar adelante este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación del trabajo.....	2
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Alcances.....	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Minera Escondida Ltda.....	4
2.1.1	Superintendencia de Planificación a Largo Plazo.....	5
2.1.2	Años y fases prioritarias a simular con tecnología autónoma.....	6
2.2	Simulación de procesos.....	7
2.2.1	Conceptos de simulaciones.....	7
2.2.2	Modelo de simulación de eventos discretos.....	8
2.2.3	Ventajas y desventajas del uso de simulaciones.....	8
2.2.4	Elementos clave para el éxito del uso de simulaciones.....	8
2.3	Delphos Open Pit Simulator.....	9
2.3.1	Layout de la mina.....	9
2.3.2	Flota de equipos de carguío y transporte.....	10
2.3.3	Plan de extracción.....	10
2.3.4	Reportes.....	11
2.4	Modelo de clasificación de horas.....	11
2.4.1	Índices operacionales.....	12
2.5	Automatización y control de procesos.....	14
2.5.1	Fuerzas impulsoras de la automatización en minería.....	14
2.5.2	Camiones autónomos.....	14
2.5.3	Simulaciones y experiencia previa en operaciones con flotas de equipos de transporte autónomos.....	25
2.6	Estudio conceptual de la implementación de un sistema de camiones autónomos en distrito Minera Escondida.....	31
2.6.1	Análisis conceptual técnico.....	31
2.6.2	Análisis económico.....	36
3	METODOLOGÍA.....	39
3.1	Actualización de topografía y trazado de rutas.....	39
3.2	Plan de producción.....	39

3.3	Modelamiento usando <i>software</i> de simulación.....	39
3.4	Simulaciones.....	40
3.5	Análisis de resultados .....	40
4	CASO DE ESTUDIO.....	41
4.1	Casos a simular .....	41
4.2	Plan de producción.....	41
4.3	Rendimiento de chancadores .....	41
4.4	Equipos de carguío.....	42
4.5	Equipos de transporte manuales.....	42
4.5.1	Tiempos fijos de actividades y <i>matching</i> entre palas y camiones manuales .....	43
4.6	Equipos de transporte autónomos .....	44
4.6.1	Tiempos fijos de actividades y <i>matching</i> entre palas y camiones autónomos.....	45
4.7	<i>Layout</i> de la faena .....	46
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	49
5.1	Casos base.....	49
5.1.1	FY 2024 .....	49
5.1.2	FY 2025 .....	53
5.1.3	FY 2026.....	57
5.1.4	FY 2027 .....	61
5.1.5	FY 2028.....	65
5.2	Casos con proyecto .....	69
5.2.1	FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma .....	70
5.2.2	FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma .....	75
5.2.3	FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma 78	
5.2.4	FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma.....	83
5.2.5	FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma .....	87
5.2.6	FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma	92
5.2.7	FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma 96	
5.2.8	FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma 100	
5.2.9	FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma	104
6	DISCUSIÓN.....	107
6.1	Casos base.....	107

6.2	Casos con proyecto .....	108
6.2.1	Escondida Norte .....	108
6.2.2	Escondida .....	110
7	CONCLUSIÓN .....	115
8	BIBLIOGRAFÍA .....	118
9	ANEXOS .....	120
9.1	Modelo de simulación (Tesis Doctoral de Juliana Parreira, 2013).....	120
9.1.1	Layout de la mina .....	122
9.2	Parámetros ingresados al modelo de (Evaluación para análisis económico del impacto de tecnologías autónomas de transporte elaborado por Haultrax) .....	123
9.3	Parámetros de distribuciones de frecuencia.....	124
9.3.1	Distribución Uniforme.....	124
9.3.2	Distribución Normal .....	124
9.3.3	Distribución Triangular .....	124
9.3.4	Distribución Gamma .....	125
9.3.5	Distribución Weibull .....	125
9.4	Plan de producción.....	126
9.4.1	FY 2024 .....	126
9.4.2	FY 2025 .....	128
9.4.3	FY 2026.....	130
9.4.4	FY 2027 .....	132
9.4.5	FY 2028 .....	134
9.5	Topografías por año simulado .....	136
9.5.1	FY 2024 .....	136
9.5.2	FY 2025 .....	137
9.5.3	FY 2026.....	138
9.5.4	FY 2027 .....	139
9.5.5	FY 2028.....	140
9.6	Rutas por año simulado.....	141
9.6.1	Casos Base .....	141
9.6.2	Casos con proyecto.....	146
9.7	Tiempos de ciclo .....	155
9.7.1	Casos Base .....	155
9.7.2	Casos con proyecto.....	160
9.8	Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base .....	169

9.8.1	FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma .....	169
9.8.2	FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma .....	170
9.8.3	FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma 171	
9.8.4	FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma.....	172
9.8.5	FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma .....	173
9.8.6	FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma 174	
9.8.7	FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma 175	
9.8.8	FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma 176	
9.8.9	FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma	177

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2-1: Vista Google Earth Minera Escondida.....	4
Figura N° 2-2: Diagrama de sistema de acarreo autónomo.....	15
Figura N° 2-3: Sistema de detección de obstáculos.....	17
Figura N° 2-4: Burbuja de seguridad Komatsu.....	20
Figura N° 2-5: Zona de seguridad CAT.....	23
Figura N° 2-6: Representación gráfica de las diferencias entre las tecnologías CAT y Komatsu.....	24
Figura N° 2-7: Ancho de rampa para caminos horizontales, considerando camiones manuales CAT 797F.....	32
Figura N° 2-8: Ancho de rampa para caminos con pendientes, considerando camiones manuales CAT 797F.....	32
Figura N° 2-9: Ancho de rampa para caminos sin pared lateral, considerando camiones manuales CAT 797F.....	33
Figura N° 2-10: Gráfica representativa de modelos de descarga en chancado.....	34
Figura N° 2-11: Dimensiones y profundidad de rajo Escondida.....	35
Figura N° 2-12: Dimensiones y profundidad de rajo Escondida Norte.....	35
Figura N° 2-13: Esquema conceptual de modelo de evaluación de Haultrax para análisis de costos.....	36
Figura N° 4-1: Layout rajo Escondida según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.....	47
Figura N° 4-2: Layout rajo Escondida Norte según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.....	48
Figura N° 4-3: Layout pilas de lixiviación estáticas de sulfuros de cobre de baja ley según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.....	48
Figura N° 5-1: Stocks intermedios de mineral de cobre oxidado con y sin arcilla, 2024.....	70
Figura N° 5-2: Dos pisos en pilas de lixiviación dinámica para división camiones autónomos y manuales.....	71
Figura N° 5-3: Estacionamiento camiones autónomos para transporte a Truck Shop.....	72
Figura N° 5-4: Stocks intermedios de mineral mixto y Sob3125n.....	75
Figura N° 5-5: Tres pisos en pilas de lixiviación dinámica, creación de stocks exclusivos y vía adicional requerida para mantener exclusividad de rutas por flota.....	79
Figura N° 5-6: Exclusividad de uso de chancadores, intersección de rutas y entrada exclusiva a truck shop para cada flota de camiones.....	79
Figura N° 5-7: Rutas desviadas de fase N17 para caso fases P11 y N18 autónomas, 2026.....	80
Figura N° 5-8: Rutas desviadas de fase N17 para caso fases S4 autónoma, 2026.....	84
Figura N° 5-9: Stocks intermedios de mineral de cobre oxidado con y sin arcilla, 2027.....	88
Figura N° 5-10: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida, en caso P11, P11s y N18 autónomas, 2027.....	89
Figura N° 5-11: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida, en caso N17, y S4 autónomas, 2027.....	93
Figura N° 5-12: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso P11s y N18 autónomas, 2027.....	97
Figura N° 5-13: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso S4 y N17 autónomas, 2027.....	101
Figura N° 5-14: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso full autónomo, 2027.....	104
Figura N° 9-1: Variables de entrada y resultados provistos por el modelo.....	120
Figura N° 9-2: Flowchart de información en modelo.....	121

Figura N° 9-3: Rutas de transporte de mineral. Escala 500mx500m. ....	122
Figura N° 9-4: Topografía FY 2024. ....	136
Figura N° 9-5: Topografía FY 2025. ....	137
Figura N° 9-6: Topografía FY 2026. ....	138
Figura N° 9-7: Topografía FY 2027. ....	139
Figura N° 9-8: Topografía FY 2028. ....	140
Figura N° 9-9: Rutas FY 2024. ....	141
Figura N° 9-10: Rutas FY 2025. ....	142
Figura N° 9-11: Rutas FY 2026. ....	143
Figura N° 9-12: Rutas FY 2027. ....	144
Figura N° 9-13: Rutas FY 2028. ....	145
Figura N° 9-14: Rutas en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024. ....	146
Figura N° 9-15: Rutas en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025. ....	147
Figura N° 9-16: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026. ....	148
Figura N° 9-17: Rutas en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026. .	149
Figura N° 9-18: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027. ....	150
Figura N° 9-19: Rutas en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027. ....	151
Figura N° 9-20: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028. ....	152
Figura N° 9-21: Rutas en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028. ....	153
Figura N° 9-22: Rutas en caso Escondida full autónomo, FY 2028. ....	154

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2-1: Elementos del layout de la mina requeridos por DSIM. ....	10
Tabla N° 2-2: Modelo de clasificación de horas. ....	11
Tabla N° 2-3: Comparación disponibilidad mecánica de camiones manuales vs autónomos. ....	26
Tabla N° 2-4: Comparación utilización de camiones manuales vs autónomos. ....	26
Tabla N° 2-5: Comparación promedio y desviación estándar de velocidad de camiones manuales (por tipo de conductor) vs autónomos. ....	27
Tabla N° 2-6: Comparación productividad de camiones manuales vs autónomos. ....	28
Tabla N° 2-7: Comparación consumo combustible de camiones manuales vs autónomos. ....	29
Tabla N° 2-8: Comparación desgaste neumáticos de camiones manuales vs autónomos. ....	29
Tabla N° 2-9: Resumen análisis de caminos para rajo Escondida y Escondida Norte. ....	33
Tabla N° 2-10: Resumen análisis plataformas de Chancado de operación actual MEL. ....	34
Tabla N° 2-11: Componentes considerados en análisis económicos. ....	36
Tabla N° 2-12: Resultados de análisis económico para rajo Escondida de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax. ....	37
Tabla N° 2-13: Resultados de análisis económico para rajo Escondida Norte de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax. ....	38
Tabla N° 4-1: Capacidades nominales de equipos de chancado primario. ....	41
Tabla N° 4-2: Modelos de palas de cable a utilizar para las ismulaciones. ....	42
Tabla N° 4-3: Utilización y disponibilidad mecánica comprometida para años a simular. ....	42
Tabla N° 4-4: Factores de carga de equipos Komatsu 960E y CAT 797. ....	43
Tabla N° 4-5: Perfiles de velocidad estimada a partir del P90 de información histórica para equipos Komatsu 960E y CAT 797. ....	43
Tabla N° 4-6: Interrupciones programadas para un día de operación normal manual. ....	43
Tabla N° 4-7: Tiempos fijos de carga y descarga equipos de transporte manuales. ....	44
Tabla N° 4-8: Perfiles de velocidad estimada para equipos Komatsu 980E. ....	45
Tabla N° 4-9: Interrupciones programadas para un día de operación de equipos autónomos. ....	45
Tabla N° 4-10: Tiempos fijos de carga y descarga equipos de transporte autónomos. ....	45
Tabla N° 5-1: Producción simulación caso base, 2024. ....	49
Tabla N° 5-2: Tiempo de actividades de camiones, FY 2024. ....	52
Tabla N° 5-3: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2024. ....	53
Tabla N° 5-4: Producción simulación caso base, 2025. ....	53
Tabla N° 5-5: Tiempo de actividades de camiones, FY 2025. ....	56
Tabla N° 5-6: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2025. ....	56
Tabla N° 5-7: Producción simulación caso base, 2026. ....	57
Tabla N° 5-8: Tiempo de actividades de camiones, FY 2026. ....	60
Tabla N° 5-9: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2026. ....	61
Tabla N° 5-10: Producción simulación caso base, 2027. ....	61
Tabla N° 5-11: Tiempo de actividades de camiones, FY 2027. ....	64
Tabla N° 5-12: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2027. ....	65
Tabla N° 5-13: Producción simulación caso base, 2028. ....	65
Tabla N° 5-14: Tiempo de actividades de camiones, FY 2028. ....	68
Tabla N° 5-15: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2028. ....	69
Tabla N° 5-16: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024. ....	72

Tabla N° 5-17: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	72
Tabla N° 5-18: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	73
Tabla N° 5-19: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	76
Tabla N° 5-20: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	76
Tabla N° 5-21: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	76
Tabla N° 5-22: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	80
Tabla N° 5-23: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	81
Tabla N° 5-24: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	81
Tabla N° 5-25: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	85
Tabla N° 5-26: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, 2026.....	85
Tabla N° 5-27: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	85
Tabla N° 5-28: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	89
Tabla N° 5-29: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	90
Tabla N° 5-30: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	90
Tabla N° 5-31: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	93
Tabla N° 5-32: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	94
Tabla N° 5-33: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	94
Tabla N° 5-34: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	97
Tabla N° 5-35: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	98
Tabla N° 5-36: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, 2028.....	98
Tabla N° 5-37: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	101
Tabla N° 5-38: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	102
Tabla N° 5-39: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	102
Tabla N° 5-40: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	104

Tabla N° 5-41: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	105
Tabla N° 5-42: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	105
Tabla N° 6-1: Cumplimiento del plan de producción diario de las simulaciones en los casos base.....	107
Tabla N° 6-2: Resultados de ciclos de camiones en casos base.....	107
Tabla N° 6-3: Índices operacionales de casos base.....	108
Tabla N° 6-4: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en Escondida Norte.....	109
Tabla N° 6-5: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en el caso con proyecto de flota autónoma en fases P11, P11s y N18 en Escondida.....	111
Tabla N° 6-6: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en el caso con proyecto de flota autónoma en fases S4 y N17 en Escondida.....	113
Tabla N° 9-1: Número de segmentos y distancia por ruta.....	123
Tabla N° 9-2: Resumen de parámetros económicos tomados en consideración para análisis económico de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.....	123
Tabla N° 9-3: Resumen de parámetros de uso del tiempo tomados en consideración para análisis económico de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.....	123
Tabla N° 9-4: Plan de producción planificado diario FY 2024.....	126
Tabla N° 9-5: Plan de producción planificado diario FY 2025.....	128
Tabla N° 9-6: Plan de producción planificado diario FY 2026.....	130
Tabla N° 9-7: Plan de producción planificado diario FY 2027.....	132
Tabla N° 9-8: Plan de producción planificado diario FY 2028.....	134
Tabla N° 9-9: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	169
Tabla N° 9-10: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	170
Tabla N° 9-11: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	171
Tabla N° 9-12: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	172
Tabla N° 9-13: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	173
Tabla N° 9-14: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	174
Tabla N° 9-15: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	175
Tabla N° 9-16: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	176
Tabla N° 9-17: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	177

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 2-1: Resultados gráficos de análisis económico para rajo Escondida de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.....	37
Gráfico N° 2-2: Resultados gráficos de análisis económico para rajo Escondida Norte de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.....	38
Gráfico N° 5-1: Producción FY 2024 vs planificada.....	50
Gráfico N° 5-2: Tonelaje por hora de simulación, FY 2024.....	50
Gráfico N° 5-3: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2024.....	51
Gráfico N° 5-4: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2024.....	51
Gráfico N° 5-5: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2024.....	52
Gráfico N° 5-6: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2024.....	53
Gráfico N° 5-7: Producción FY 2025 vs planificada.....	54
Gráfico N° 5-8: Tonelaje por hora de simulación, FY 2025.....	54
Gráfico N° 5-9: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2025.....	55
Gráfico N° 5-10: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2025.....	55
Gráfico N° 5-11: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2025.....	56
Gráfico N° 5-12: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2025.....	57
Gráfico N° 5-13: Producción FY 2026 vs planificada.....	58
Gráfico N° 5-14: Tonelaje por hora de simulación, FY 2026.....	58
Gráfico N° 5-15: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2026.....	59
Gráfico N° 5-16: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2026.....	59
Gráfico N° 5-17: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2026.....	60
Gráfico N° 5-18: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2026.....	61
Gráfico N° 5-19: Producción FY 2027 vs planificada.....	62
Gráfico N° 5-20: Tonelaje por hora de simulación, FY 2027.....	62
Gráfico N° 5-21: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2027.....	63
Gráfico N° 5-22: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2027.....	63
Gráfico N° 5-23: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2027.....	64
Gráfico N° 5-24: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2027.....	65
Gráfico N° 5-25: Producción FY 2028 vs planificada.....	66
Gráfico N° 5-26: Tonelaje por hora de simulación, FY 2028.....	66
Gráfico N° 5-27: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2028.....	67
Gráfico N° 5-28: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2028.....	67
Gráfico N° 5-29: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2028.....	68
Gráfico N° 5-30: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2028.....	69
Gráfico N° 5-31: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	73
Gráfico N° 5-32: Desglose tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	74
Gráfico N° 5-33: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	74
Gráfico N° 5-34: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	77
Gráfico N° 5-35: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	77

Gráfico N° 5-36: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	78
Gráfico N° 5-37: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	82
Gráfico N° 5-38: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	82
Gráfico N° 5-39: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.....	83
Gráfico N° 5-40: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	86
Gráfico N° 5-41: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	86
Gráfico N° 5-42: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	87
Gráfico N° 5-43: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	91
Gráfico N° 5-44: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	91
Gráfico N° 5-45: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.....	92
Gráfico N° 5-46: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	94
Gráfico N° 5-47: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	95
Gráfico N° 5-48: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.....	95
Gráfico N° 5-49: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	99
Gráfico N° 5-50: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	99
Gráfico N° 5-51: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	100
Gráfico N° 5-52: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	102
Gráfico N° 5-53: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	103
Gráfico N° 5-54: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.....	103
Gráfico N° 5-55: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	105
Gráfico N° 5-56: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida full autónomo, FY 2028.....	106

Gráfico N° 5-57: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida full autónomo, FY 2028. ....	106
Gráfico N° 6-1: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base (flota manual) y el caso con proyecto (flota autónoma) en Escondida Norte. ....	109
Gráfico N° 6-2: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en fases P11, P11s y N18 en Escondida. ....	111
Gráfico N° 6-3: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en fases S4 y N17 en Escondida. ....	112
Gráfico N° 6-4: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en Escondida. ....	113
Gráfico N° 9-1: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2024.....	155
Gráfico N° 9-2: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2025.....	156
Gráfico N° 9-3: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2026.....	157
Gráfico N° 9-4: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2027.....	158
Gráfico N° 9-5: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2028.....	159
Gráfico N° 9-6: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.....	160
Gráfico N° 9-7: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.....	161
Gráfico N° 9-8: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026. ....	162
Gráfico N° 9-9: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.....	163
Gráfico N° 9-10: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027. ....	164
Gráfico N° 9-11: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027. ....	165
Gráfico N° 9-12: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.....	166
Gráfico N° 9-13: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028. ....	167
Gráfico N° 9-14: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida full autónomo, FY 2028. ....	168

# 1 INTRODUCCIÓN

El cambiante escenario económico y social de la industria minera metálica, en el cual se busca minimizar los costos de producción, con el fin de aumentar el margen de utilidad de cada tonelada producida, y el riesgo a la seguridad de los operadores que realizan labores en las faenas mineras, ha impulsado la búsqueda de tecnologías de innovación en diversos procesos involucrados en la operación de faenas mineras.

Las empresas mineras, en su búsqueda de mejora continua a sus activos, constantemente persiguen metas que permitan mantener sus operaciones en el entorno en el cual desarrollan sus actividades (licencia social) y sostener una posición de actor competitivo en el mercado. Existen diversos parámetros que permiten registrar este progreso, dentro de los cuales se encuentran:

- ❖ Alcanzar una baja frecuencia de accidentabilidad
- ❖ Obtener una alta productividad
- ❖ Optimizar la utilización de equipos e instalaciones
- ❖ Mantener una mínima variabilidad de la calidad del producto

Se dice comúnmente que una empresa minera alcanza la calidad de clase mundial cuando ésta logra ubicar su costo unitario de producción dentro del primer cuartil de los costos promedio de la industria (Cochilco, 2015).

Teniendo en cuenta estos objetivos, los avances de las últimas décadas han permitido desarrollar tecnologías de automatización y control remoto de operaciones. Uno de los adelantos que se encuentra aún incipiente en su implementación, pero que puede significar un aumento importante en la eficiencia de la operación mina, corresponde a flotas autónomas de transporte de materiales.

Minera Escondida Ltda. es una empresa minera dedicada a la extracción de un depósito masivo de cobre por medio de un rajo abierto en la Región de Antofagasta, Chile. Actualmente la faena se encuentra atravesando una fase de desarrollo que involucra mantener su posición como mayor productora de cobre a nivel mundial y optimizar procedimientos con el fin de disminuir costos por tonelada de concentrado y cátodos producidos, considerando la baja progresiva a la ley de cabeza del mineral de interés que caracteriza a operaciones que han alcanzado una etapa avanzada de explotación.

Uno de los proyectos estratégicos de la gerencia de planificación, para mantener su calidad de empresa minera de clase mundial, corresponde a estudiar una posible integración de flotas autónomas en la operación.

El presente informe corresponde a un análisis del impacto en la planificación minera que tendría el implementar tecnologías autónomas de transporte en Minera Escondida, a través de simulaciones realizadas con el *software Delphos Open Pit Simulator* (DSIM).

## 1.1 Motivación del trabajo

Uno de los focos actuales de desarrollos de innovación en minería es el uso de tecnologías de operación remota y automatización de equipos y sistemas (Business Wire, 2018). Este tipo de avances implican un cambio significativo en lo que son los esfuerzos en investigación y desarrollo (I&D) en todo lo que son las operaciones de extracción y procesamiento de minerales.

Los sistemas autónomos permiten que los humanos se comuniquen y controlen equipos de manera remota, sin la necesidad de exponerse a los ambientes hostiles que caracterizan a las faenas mineras, disminuyendo riesgos de salud y seguridad, y lograr hacer más atractiva a la industria, ofreciendo mejores condiciones de trabajo. Algunas ventajas que prometen estos sistemas son una mayor utilización de los equipos de transporte, menores tasas de desgaste de los neumáticos, un consumo más eficiente de combustible, mayor vida útil y, por lo tanto, menor cantidad de desechos, que se traduce en un menor impacto ambiental.

Minera Escondida, como parte de sus proyectos integrales a largo plazo, tiene considerado el evaluar la incorporación de esta tecnología en proyectos de extracción de depósitos satélite (Chimborazo y Pinta Verde), Escondida Norte y Escondida, enfocándose en:

- ❖ Analizar en primera instancia el caso de dividir los sistemas actuales de la operación global en Escondida Norte y Escondida, integrando flotas de camiones autónomos en la primera.
- ❖ Analizar si Escondida puede ser dividida en sistemas paralelos para implementar camiones autónomos. Identificar fases que puedan ser aisladas en las cuales utilizar flotas autónomas (de manera de evitar interferencias entre tecnologías de camiones).

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo general

Realizar un análisis de cómo podría incorporarse la tecnología de camiones autónomos a la operación actual de Minera Escondida, definiendo rutas exclusivas para cada tipo de tecnología, y evaluar estos casos mediante simulaciones de eventos discretos, en el *software* autenticado y utilizado con anterioridad D-Sim. Como se trata de un tiempo futuro, la comparación se realiza a partir de resultados del simulador en productividad total mina y KPI de camiones para escenarios sin cambios respecto a la operación actual e incorporando esta nueva tecnología.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos por etapas de desarrollo del proyecto se encuentran listados a continuación:

- ❖ Definir una potencial estrategia de incorporación paulatina de camiones autónomos en las operaciones de Minera Escondida.

- ❖ Establecer un caso base de comparación a partir de simulaciones la actual operación de Minera Escondida.
- ❖ Implementar la estrategia de incorporación de este tipo de tecnologías en el modelo de simulación.
- ❖ Realizar una comparación cuantitativa de los datos entregados por las simulaciones, con el fin de determinar el impacto del proyecto de automatización propuesto en la operación minera.

### 1.3 Alcances

A partir de la información entregada por Minera Escondida para las simulaciones y operaciones en los años que serán analizados, se tienen los siguientes alcances para la memoria:

- ❖ Se utilizará información que provee la Superintendencia de Planificación a Largo Plazo y que ésta considera en sus propias evaluaciones, en proyectos que desarrolla para el LoA (*Life of Asset*).
- ❖ El *layout* de la mina fue corroborado por ingenieros del equipo anteriormente nombrado.
- ❖ El caso base se realiza en base a la flota de camiones que Minera Escondida tiene presupuestada para los años en que se hagan las simulaciones, obtenidas a partir del informe entregado por el *FleetAnalyzer*:  
*Reporte\_fleet\_LCEFY35\_New\_Angle.csv*
- ❖ Las características técnicas como perfiles de velocidad, capacidad, *matching* con palas, entre otros se estima a través de información histórica y considerada para los años estudiados. Por otro lado, los KPI objetivo de utilización y disponibilidad mecánica corresponden a los comprometidos en el LoA19.
- ❖ El plan de producción se obtiene de información que provee Minera Escondida a través del informe LoA19 reflejado en el proyecto de *MineHaul2*:  
*LoA19\_LCE35\_New\_Angle\_OP5 ESTRS.mh2*
- ❖ Las especificaciones de camiones autónomos serán estimadas a partir de información comercial y que pueda proveer Minera Escondida.
- ❖ No se analizará la automatización de otros equipos (que no sean camiones) y operaciones que también podrían ser automatizables como lo son la de carguío, perforación, la tronadura, el riego de los caminos y la obtención de información topográfica, entre otras.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Minera Escondida Ltda.

Minera Escondida Ltda. es una empresa minera dedicada a la extracción de cobre desde los yacimientos que ha recibido en concesión en la Región de Antofagasta, Chile. Está situada a 170 km al sureste de la ciudad de Antofagasta, a una altura de 3.100 metros sobre el nivel del mar.



Figura N° 2-1. Vista Google Earth Minera Escondida.

La estructura de su propiedad está compuesta por BHP Billiton, compañía operadora, con el 57.5%; Río Tinto con el 30%; JECO Corporation con el 10%; y JECO 2 LTD con el 2,5%.

La minera produce concentrado y cátodos de cobre a través de la explotación de dos rajos abiertos: Escondida y Escondida Norte. El concentrado de cobre se obtiene a través del proceso de flotación de mineral sulfurado y los cátodos de cobre mediante lixiviación de mineral oxidado, biolixiviación de sulfuros de baja ley, extracción por solventes y electro-obtención.

La infraestructura actual en faena consiste en sistemas de chancado y transporte de mineral, tres plantas concentradoras (Los Colorados, Laguna Seca y OGP1), dos pilas de lixiviación (una pila de lixiviación dinámica de óxidos y una estática de tratamiento de sulfuros de baja ley por biolixiviación), dos plantas de extracción por solventes y una planta de electro-obtención. El transporte de productos finales se realiza por trenes, en el caso de cátodos de cobre, hasta el puerto

de Antofagasta y dos mineroductos que transportan el concentrado hasta las instalaciones en Puerto Coloso, al sur de Antofagasta, donde es filtrado y embarcado a los clientes. Allí operan también dos plantas desalinizadoras de agua de mar que producen agua para uso industrial, la cual es bombeada hasta la mina a través de un acueducto de 166 km.

### 2.1.1 Superintendencia de Planificación a Largo Plazo

La Superintendencia de Planificación a Largo Plazo se encarga principalmente del planteamiento y desarrollo de la estrategia de la empresa. Sus responsabilidades y objetivos son transversales a la empresa:

- ❖ debe seguir los lineamientos estipulados en la Carta de Valores institucional,
- ❖ debe buscar la ventaja comparativa con respecto a otros actores en el mercado internacional de minerales,
- ❖ busca resolver el problema de extracción (cuánto y cuándo extraer) a través de proyectos de expansión, postergación e integración de nuevas tecnologías,
- ❖ debe diseñar un calendario de inversiones que permitan la sustentación de las actividades propias de la faena minera y
- ❖ debe examinar diversos posibles escenarios que presente la industria y presentar planes de mitigación.

Dentro de las actividades más importantes que se realizan en el área, se encuentra la confección del Life of Asset (LoA), que corresponde a la planificación de actividades hasta el cierre de mina. Este estudio se realiza tomando en cuenta el año fiscal (FY, por su traducción al inglés) el cual considera el período entre julio de un año y junio del año siguiente. A continuación, se presenta un resumen de las actividades que se deben llevar a cabo para analizar un proyecto de desarrollo de un depósito minero desde el modelo de bloques:

1. **Modelo de bloques:** se analiza y prepara el modelo de bloques para la definición del pit final y el diseño de fases.
  - ❖ Se delimita la propiedad cuando es requerido.
  - ❖ Se definen las zonas geológicas para aplicar parámetros geotécnicos adeptos.
2. **Blasor Flow:** corresponde al programa utilizado para definir el pit final y planear el secuenciamiento de fases.
  - ❖ Se define el *flowsheet* con todos los procesos y costos involucrados en el procesamiento de mineral.
  - ❖ Se obtiene el pit final.
  - ❖ Se obtiene una recomendación de fases de acuerdo al resultado de la optimización de Lersch y Grossman tomando en cuenta algunos parámetros de diseño.
3. **Designer ↔ Vulcan**
  - ❖ Se diseñan las fases en el *software* Designer (tomando en cuenta parámetros geotécnicos por zona).
  - ❖ En Vulcan se obtienen las topografías resultantes y se cubican los sólidos de fases a extraer.
4. **Pregraph:** *software* que permite preparar los datos a ser utilizados para desarrollar el serrucho.

- ❖ Se define el orden de fases y topografía final resultante.
- 5. **Serrucho:** utilizado para definir las palas necesarias en cada fase para asegurar una cuota de mineral expuesto (6 meses).
  - ❖ Se define la cantidad total de palas requeridas por año.
  - ❖ Se definen las leyes de corte para cada año.
  - ❖ Se obtiene la foto final resultante.
- 6. **PlanProcess:** *software* utilizado para asignar el material a cada uno de los destinos posibles dependiendo de su calidad.
  - ❖ Se definen los tipos de mineral (alta o baja ley, óxido o sulfuro, lastre, entre otros).
  - ❖ Se definen los destinos o procesos posibles para tartar el mineral.
- 7. **MineHaul:** programa utilizado para definir rutas y equipos de transporte requeridos por año para transportar el material a extraer.
  - ❖ Se definen rutas y tipos de camión a utilizar.
  - ❖ Se diseñan botaderos y modo en que son desarrollados.
  - ❖ Se obtienen los tiempos de ciclo por circuito.
- 8. **FleetAnalyser:** *software* utilizado para obtener el número de equipos de apoyo a la operación para desarrollar el proyecto.
  - ❖ Se definen perforadoras y equipo auxiliar requerido.
- 9. **Plan mina y reporte de finanzas:** se resume todo lo anterior en estos dos reportes que son los entregables finales utilizados en la redacción del LoA.

## 2.1.2 Años y fases prioritarias a simular con tecnología autónoma

Dentro del marco de proyectos de automatización y control de procesos impulsado por el equipo de planificación minera de largo plazo se encuentra el desarrollo de procesos de transporte con tecnología autónoma.

Dentro de los proyectos en cartera que incluyen esta tecnología se tiene:

### 2.1.2.1 Depósitos satélite (no analizado en este estudio)

Los proyectos de desarrollo de depósitos satélite (Pinta Verde y Chimborazo) tienen proyectado desde su comienzo el operar con camiones autónomos.

### 2.1.2.2 Rajo Escondida Norte

El rajo Escondida Norte tiene estipulado un traspaso a esta nueva tecnología para el año FY 2024, comenzando con la compra de equipos el FY 2023.

### 2.1.2.3 Rajo Escondida

El rajo principal de Minera Escondida, dadas sus dimensiones, tiene proyectado la automatización en etapas (traducido en fases), tras la automatización de Escondida Norte para contar con experiencia en el uso de esta tecnología en operaciones de gran envergadura. Se proyecta que el proceso de automatización podría comenzar el FY 2026. Para esto se deben identificar *pushbacks* que compartan caminos por los cuales transiten camiones asignados a estas frentes. El

objetivo es no mezclar equipos manuales con autónomos dadas las ineficiencias que podrían generarse.

Las fases a las cuales se está dando mayor prioridad para realizar este cambio de tecnología son las siguientes:

- ❖ Fondos mina en los cuales existe un mayor riesgo por fallas geotécnicas de fases profundas (como fases PL).
- ❖ Fases cercanas a tranque Hamburgo, debido a que a partir del FY 2022 se comenzará con el movimiento de este tranque de relaves y no se tiene información de posibles inestabilidades que se puedan provocar (como la fase S4).

## **2.2 Simulación de procesos**

La simulación es la imitación de un proceso o sistema de la vida real, en el tiempo. Esta involucra la generación y observación de un registro histórico del sistema para sacar conclusiones relativas a las características del sistema real que se está representando (Banks, 1999).

### **2.2.1 Conceptos de simulaciones**

Para tener una mejor comprensión de cómo se trabaja con simulaciones, corresponde el analizar cuáles son los elementos que las componen (Banks, 1999).

- ❖ Sistema, modelo y evento: un modelo es una representación de un sistema (proceso). Un evento es una ocurrencia que cambia el estado en el cual se encuentra el sistema.
- ❖ Variables de estado del sistema: corresponden a la colección de la información necesaria para definir qué ocurre en cada momento en el sistema. La determinación de estas variables es vital para comprender el sistema, sin embargo, muchas veces son difíciles de precisar.
- ❖ Entidades y atributos: una entidad es todo componente del sistema, el cual puede ser dinámico o estático. Cada entidad tiene atributos, que pueden ser únicos, que la definen.
- ❖ Recursos: corresponde a una entidad que provee servicios a una entidad dinámica. A estos es a los cuales se aplican las restricciones propias del sistema.
- ❖ Lista de procedimientos: corresponde a los pasos o etapas que se consideran en el modelo en las cuales entidades se relacionan entre sí por medio de recursos para alcanzar algún objetivo.
- ❖ Actividades y demoras: una actividad es un período de tiempo cuya duración se conoce con antelación y por lo tanto puede ser agendada. Una demora es un período de tiempo indefinido causado por alguna condición del sistema y en que alguna entidad entra a una cola por un recurso.

### 2.2.2 Modelo de simulación de eventos discretos

Un modelo de simulación de eventos discretos corresponde a uno en el cual las variables de estado sólo cambian en puntos discretos en momentos en que ocurre un evento.

### 2.2.3 Ventajas y desventajas del uso de simulaciones

Existen distintos motivos por los cuales hacer uso de simulaciones puede resultar provechoso. A continuación, se presentan los más relevantes (García et al, 2006):

- ❖ Mejor comprensión del sistema: muchas veces se busca entender por qué algún fenómeno ocurre en un sistema real. A través del uso de simulaciones, se puede reconstruir una escena y analizar el estado del sistema a través de un control absoluto, sin necesidad de detener la operación actual.
- ❖ Explorar posibilidades: una de las mayores ventajas es que, una vez que se ha desarrollado un modelo válido para la operación, se pueden analizar nuevos procedimientos que podrían aumentar la eficiencia del sistema.
- ❖ Mayor información al tomar decisiones: como se mencionó anteriormente, se pueden hacer análisis de cómo es afectado el sistema tras efectuar algún cambio, sin la necesidad previa de comprometer recursos.
- ❖ Diagnosticar problemas: dada la complejidad de los sistemas, se puede analizar en mejor medida la relación de una variable con respecto a las demás para obtener un resultado deseado.
- ❖ Identificar restricciones: las simulaciones pueden permitir determinar cuáles elementos del sistema son “cuellos de botella” y cuáles tienen oportunidades de mejora.

Por otro lado, realizar simulaciones puede significar el complejizar y causar mayor duda en los operadores del sistema. Se presentan a continuación los aspectos que se deben tener en cuenta al realizar simulaciones.

- ❖ La simulación no es una herramienta de optimización: sin embargo, puede ayudar a entender el sistema para desarrollar un algoritmo de optimización.
- ❖ Dificultades de crear un modelo: en casos de alta complejidad, el definir las variables de estado del sistema y cómo estas se relacionan, requieren de un arduo trabajo y análisis de los registros históricos, lo cual consume tiempo y puede implicar una alta inversión.
- ❖ Entrenamiento de personal: para un correcto análisis y utilización de las simulaciones, los operadores deben ser instruidos en los usos del *software*.

### 2.2.4 Elementos clave para el éxito del uso de simulaciones

Como se mencionó anteriormente, para un correcto uso de *software* de simulación se deben tener algunos aspectos en consideración (García et al, 2006).

- ❖ Cantidad de réplicas o corridas: debe ser tal que se alcance un grado de certeza razonable y por otro lado se obtenga un resultado estable, es decir, que cuando se corra nuevamente la simulación, el resultado no varíe en una gran magnitud.
- ❖ Tamaño de la corrida: se debe considerar el espacio de tiempo en el cual se encuentra operando el sistema y en el cual se pueden analizar los resultados del evento simulado. Si se toma un período de tiempo muy corto, puede que no se alcance a ver el efecto de las modificaciones que se hizo sobre el modelo.
- ❖ Error al establecer las relaciones entre variables: si la variable de respuesta no es la adecuada, será imposible tomar decisiones que tengan impacto sobre el sistema definido.
- ❖ Error al determinar la distribución de frecuencia de alguna variable: en un intento de simplificar al sistema, puede que no se estén tomando valores que representen la realidad.
- ❖ Uso incorrecto de la información: la información debe ser depurada y reorganizada para un correcto análisis que permita integrar este conocimiento a las simulaciones. De lo contrario, se podría caer en el efecto de GIGO (*Garbage In, Garbage Out*), donde al ingresar parámetros de entrada errados, se obtendrán resultados igualmente erróneos.
- ❖ Falta o exceso de detalle en el modelo: si se sobre simplifica el sistema, las simulaciones no podrán dar resultados útiles y por otro lado, no se alcanzará una mayor comprensión del sistema. Si se agregan muchos detalles, el costo involucrado y el tiempo para obtener resultados puede incrementarse sustancialmente.

### 2.3 Delphos Open Pit Simulator

Principalmente debido a la disponibilidad de programas para realizar la simulación de eventos tanto en la faena como en el Laboratorio de Planificación Minera de la Universidad de Chile, se hizo uso del *software* D-Sim.

*Delphos Open Pit Simulator (D-Sim)*, desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera (DELPHOS) de la Universidad de Chile, corresponde a una herramienta de planificación minera que permite realizar simulaciones de sistemas de transporte de minerales, en operaciones mineras desarrolladas por el método de cielo abierto. El sistema entrega reportes en términos de producción, velocidades y tiempos de ciclo que luego son utilizados para hacer análisis de operaciones de la faena analizada.

A continuación, se presentan los requerimientos de información de entrada (inputs) para realizar las simulaciones y los reportes que genera el sistema:

#### 2.3.1 Layout de la mina

Corresponde a la ubicación de los distintos elementos que componen una operación de rajo abierto junto con las rutas definidas entre cada uno de ellos y el sistema de señalética que gobierna al transporte. A continuación, se presentan los principales elementos que se deben ingresar al sistema como *layout* de la mina:

**Tabla N° 2-1: Elementos del *layout* de la mina requeridos por DSIM.**

<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>	
<b>Frente</b>	Carga	Frente en donde se permitirá la ubicación de equipos de carga y la consecuente carga de camiones.
	Descarga	Frente potencial de destino de material. Puede corresponder a un chancador, un botadero o un stock.
<b>Servicios</b>	Restaurant	Punto de ubicación de camiones para colación diurna.
	Taller de camiones	Potencial punto para reparación y mantención de equipos de transporte.
	Estacionamiento	Punto para ubicación de camiones durante colaciones y cambios de turno.
<b>Señalética</b>	Ceda el paso	Señal de tránsito que obliga a ceder los permisos frente a otro vehículo que se enfrente a un cruce.
	Pare	Señal de tránsito que obliga a la detención en un cruce antes de solicitar los permisos para cruzarlo.

La simulación de cruce en intersecciones de rutas de equipos de transporte se realiza por medio de permisos. La solicitud de permiso de cruce, por parte de un camión, se efectúa una cierta distancia antes de llegar al cruce. Ésta es rechazada si:

- ❖ Ya existe algún otro vehículo con los permisos tomados
- ❖ Existe un disco pare
- ❖ Hay un vehículo en la vecindad y el camión tiene una señal de ceda el paso en su ruta

### **2.3.2 Flota de equipos de carguío y transporte**

El *software* DSIM requiere explicitar características tanto de equipos de carguío como de transporte:

- ❖ Los equipos de carga son definidos con un identificador único (ID), tipo (o grupo) y propiedades asociadas al modelo de fallas de los mismos.
- ❖ Los equipos de transporte son definidos por un identificador único (ID), un tipo (o grupo), perfiles de velocidad y consumo de combustible, y también propiedades asociadas a modelos de fallas.

Adicionalmente se definen cuáles son los equipos de carga compatibles para cada equipo, especificando el *matching* entre equipos de carga y transporte (factor de carga y tiempo de carga).

Finalmente, el sistema permite ingresar interferencias programadas que afecten a todos los equipos (carga y transporte) o a cierta cantidad de equipos en específico. A continuación, se presentan algunos ejemplos:

- ❖ Cambios de turno
- ❖ Colaciones
- ❖ Petroleo de equipos
- ❖ Mantenciones Programadas (MP)

### **2.3.3 Plan de extracción**

El plan de extracción contempla los destinos específicos de los materiales extraídos por cada frente, cuotas de producción y prioridad de extracción de las mismas. Por otro lado, considera

la asignación de equipos de carguío a cada frente extraída junto con el número de camiones o flujo de saturación por pala (TPH) requeridos en cada recorrido para alcanzar la producción objetivo, el cual debe ser modificado por el usuario en cada simulación para conseguir la máxima producción de material, manteniendo tiempos de cola razonables. El sistema de *Dispatch* integrado en DSim considera el saturar palas que tienen destinos más cercanos, por lo que circuitos con tiempos de ciclo promedio menores tendrán prioridad frente a circuitos más extensos. Esto genera que al comienzo de la simulación se alcancen tonelajes producidos por hora más altos y luego estos disminuyan hacia el fin de la misma.

### 2.3.4 Reportes

Los resultados que entregan las simulaciones son una serie de registros de tiempos de ciclo y productividad de los equipos, y de la operación completa:

- ❖ Reporte de ciclos: incluye el set de actividades que se realizan con sus velocidades y tiempos asociados (carguío y transporte), los tonelajes por destino, actividad y productividad de palas.
- ❖ Reporte de equipos de carguío: incluye actividades realizadas por cada pala, grupos o tipos, información respecto a fallas (asociadas al modelo ingresado), eficiencia y productividad del sistema de carguío.
- ❖ Reporte de equipos de transporte: incluye actividades realizadas por cada camión, grupos o tipos, información respecto a fallas (asociadas al modelo ingresado), eficiencia y productividad del sistema de transporte.

## 2.4 Modelo de clasificación de horas

El modelo de clasificación de horas y la definición de índices operacionales considerados en este proyecto se basa en la norma ASARCO (*American Smelting & Refining Co.*). A continuación, se presentan las definiciones más relevantes del modelo.

**Tabla N° 2-2: Modelo de clasificación de horas.**

Tiempo cronológico			
Tiempo hábil			Tiempo inhábil
Tiempo disponible			Tiempo de mantención
Horas operacionales		Horas de reserva	
Horas operacionales efectivas	Horas de pérdidas operacionales	Demoras	
		Pr	No Pr

- ❖ **Tiempo cronológico:** son las horas correspondientes al tiempo calendario natural.
- ❖ **Tiempo hábil u horas hábiles:** son las horas en que la faena está en actividad productiva y/ o en tareas de mantención de sus elementos de producción
- ❖ **Tiempo inhábil u horas inhábiles:** son las horas en que la faena suspende sus actividades productivas y/o mantención de sus elementos por razones como paralizaciones

programadas, imprevistos originados y obligados por causas naturales u otras ajenas al control de la faena.

- ❖ **Tiempo disponible:** espacio de tiempo en que el equipo se encuentra mecánicamente habilitado para cumplir con su función de diseño.
- ❖ **Tiempo de mantención:** son las horas en que el equipo se encuentra fuera de servicio o no disponible, ya sea, por una mantención programada o imprevistos de tipo mecánico o eléctrico.
- ❖ **Horas de operacionales:** tiempo en que la unidad o instalación se encuentra entregada a sus operadores, en condiciones electromecánicas de cumplir su objetivo o función de diseño y con una tarea o cometido asignado. Por ejemplo: cambios de turno, tiempos de colación, entre otros.
- ❖ **Horas de reserva:** son las horas hábiles en que la unidad de equipo o instalación, estando en condiciones electromecánicas de cumplir su función u objetivo de diseño, no lo realiza por falta de operador, capacidad prevista de equipo complementario o por alguna razón no es permitido en el área de trabajo.
- ❖ **Horas operacionales efectivas:** tiempo en que la unidad de equipo o instalación está funcionando y cumpliendo su objetivo de diseño.
- ❖ **Horas de pérdidas operacionales:** tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño por motivos ajenos a su funcionamiento intrínseco: tronaduras, traslados, a la espera de equipos complementario, carga de combustibles, tiempo en colas y en general por razones asociadas a la coordinación de las operaciones.
- ❖ **Demoras programadas (Pr):** Tiempo en que el equipo no cumple su función de diseño debido a actividades normadas por ley, como horario de colación o cambio de turno. Se consideran además aquí el tiempo de espera por tronadura y por combustible.
- ❖ **Demoras no programadas (No Pr):** Tiempo en que el equipo no puede cumplir con su función de diseño, debido a condiciones propias o ineficiencias de la operación.

## 2.4.1 Índices operacionales

### 2.4.1.1 Disponibilidad mecánica

Es la fracción del total de horas hábiles, expresada en porcentaje, en la cual el equipo se encuentra en condiciones físicas de cumplir su objetivo de diseño. Se considera en caso de fallas o mantenimientos programados.

$$\text{Disponibilidad mecánica (DM)} = \frac{\text{Horas operacionales} + \text{Horas de reserva}}{\text{Horas hábiles}} \quad (1)$$

#### 2.4.1.2 Utilización

Según la norma ASARCO, es la fracción del tiempo, expresada en porcentaje, en la cual el equipo es operado por cada hora en que este está en condiciones de cumplir su objetivo de diseño o físicamente disponible.

$$Utilización (UT) = \frac{Horas\ operacionales}{Horas\ operacionales + Horas\ de\ reserva} \quad (2)$$

Minera Escondida, sin embargo, considera para sus análisis y estudios la utilización efectiva de los equipos, la cual no toma en consideración el tiempo en el cual el equipo está entregado a sus operadores pero que no puede cumplir con su función de diseño por motivos ajenos (como lo puede ser la congestión del sistema). Esta definición es la que se utilizará para los cálculos en este estudio.

$$Utilización (UT) = \frac{Horas\ operacionales\ efectivas}{Horas\ operacionales + Horas\ de\ reserva} \quad (3)$$

#### 2.4.1.3 Factor operacional (o utilización efectiva)

Es la fracción de tiempo, expresada en porcentaje, en que el equipo realiza efectivamente su función de diseño por cada hora en que es operado. Es inversamente proporcional al tiempo de pérdida operacional. Por temas operacionales se suele utilizar un porcentaje de la hora completa.

$$Factores\ operacionales\ (FO) \left[ \frac{min}{hora} \right] = \frac{Horas\ operacionales\ efectivas}{Horas\ operacionales} \quad (4)$$

#### 2.4.1.4 Productividad

Corresponde a la relación entre la cantidad de toneladas transportadas de material el tiempo utilizado para obtener dicha producción.

$$\begin{aligned} Productividad \left[ \frac{t}{d} \right] &= Horas\ operacionales\ efectivas \left[ \frac{h}{d} \right] * PE \left[ \frac{t}{h} \right] \\ &= N^{\circ} ciclos \left[ \frac{ciclos}{d} \right] * Carga\ útil \left[ \frac{t}{ciclo} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

Productividad efectiva (PE): Cantidad de material movido por el equipo en una hora efectiva.

N° de ciclos: Cantidad de ciclos (carga – transporte – descarga) que logra completar el equipo durante un día.

Carga útil: Cantidad de material con la cual el equipo es cargado en el comienzo de cada ciclo.

## **2.5 Automatización y control de procesos**

Al analizar los desafíos y expectativas que tienen las tecnologías de automatización y de control para optimizar procesos, tanto en minería como en otros rubros, se encuentra que los más importantes (o más ambiciosos) corresponden a:

- ❖ La realización de actividades sin la necesidad de un operador, de manera más eficaz, confiable y precisa. Esto se lograría a través de una optimización de las horas efectivas de equipos (eliminando tiempos perdidos) y por lo tanto obteniendo una mayor productividad. Por otro lado, un sistema autónomo reduciría malas prácticas e ineficiencias y le otorgaría consistencia al sistema.
- ❖ Al tener una mayor productividad y un mayor control del sistema se podría disminuir los costos asociados a los procesos.
- ❖ Alcanzar una mejora en la seguridad, dada principalmente por la mayor confiabilidad del sistema y la posibilidad de minimizar operadores expuestos a situaciones de riesgo.

### **2.5.1 Fuerzas impulsoras de la automatización en minería**

Se pueden clasificar en cuatro categorías principalmente (Río Tinto, 2011):

1. Fuerza empresarial: Se alinea al amplio impulso estratégico de una empresa hacia la automatización, alimentada por una búsqueda continua de mayor eficiencia operacional.
2. Fuerza de los fabricantes: El mercado de los productos autónomos es sustentado por los fabricantes de equipos originales (OEM) y las pequeñas-medianas empresas (SME) que comercializan productos, equipos y servicios ligados a la automatización. El objetivo de los OEMs es diferenciarse de sus competidores y aumentar su cuota de mercado, por lo que continuamente están a la búsqueda de nuevos avances tecnológicos que puedan mejorar los procesos y ser integrados en sus productos.
3. Fuerza en terreno: La tercera fuerza impulsora proviene desde la misma operación minera. Técnicos e ingenieros buscan las soluciones más eficientes, confiables y económicas para los problemas que enfrentan diversos procesos del área mina, en la cual desarrollan sus actividades.
4. Fuerza de investigación y desarrollo: Es cada vez más común que empresas firmen alianzas con organizaciones dedicadas a la investigación en busca de superar problemas específicos de sus operaciones.

La naturaleza dominante de estas fuerzas y su amplio alcance hacen que un creciente uso de tecnologías autónomas sea inevitable.

### **2.5.2 Camiones autónomos**

El transporte de material en una operación minera a cielo abierto, desde la frente hasta los destinos de material, es realizado comúnmente por medio de camiones. Dependiendo del tamaño,

la capacidad y el proveedor, existen dos sistemas de transmisión: mecánico y eléctrico. Actualmente, los camiones pueden alcanzar capacidades sobre 360 [ton].

Tradicionalmente, la operación de estos camiones se ha realizado manualmente. Sin embargo, debido a los avances tecnológicos de las últimas décadas y la situación de los mercados de *commodities* mundial, algunos fabricantes y operaciones han abierto el camino para la implementación de este tipo de tecnologías, en busca de:

- ❖ Reducir el número de operadores trabajando en un ambiente potencialmente peligroso y aislado, logrando así aumentar la seguridad de los trabajadores.
- ❖ Reducir los costos operacionales y extender la vida de los neumáticos y frenos.
- ❖ Aumentar la productividad y eficiencia y reducir el consumo de combustible y las emisiones.

Los sistemas de camiones autónomos actuales son esencialmente equipos sin conductor, los cuales, a través de un sistema de control, navegan según trayectorias GPS predefinidas. En general, los sistemas están compuestos por (Haultrax, 2017):

- ❖ Un sistema GPS de alta precisión, que provee la información sobre la posición de los camiones y permite trazar todas las rutas posibles de transporte en base a datos satelitales.
- ❖ Un sistema de red inalámbrico que envía un continuo flujo de datos sobre la ubicación y velocidad de cada uno de los camiones y sobre la disponibilidad del cargador, evitando así las colas y los atrasos asociados.
- ❖ Un sistema de detección de obstáculos, que le permite al equipo moverse eficientemente alrededor de distintos objetos.
- ❖ Un controlador que ejecuta las órdenes del sistema de supervisión de equipos, de acuerdo a la producción planificada.

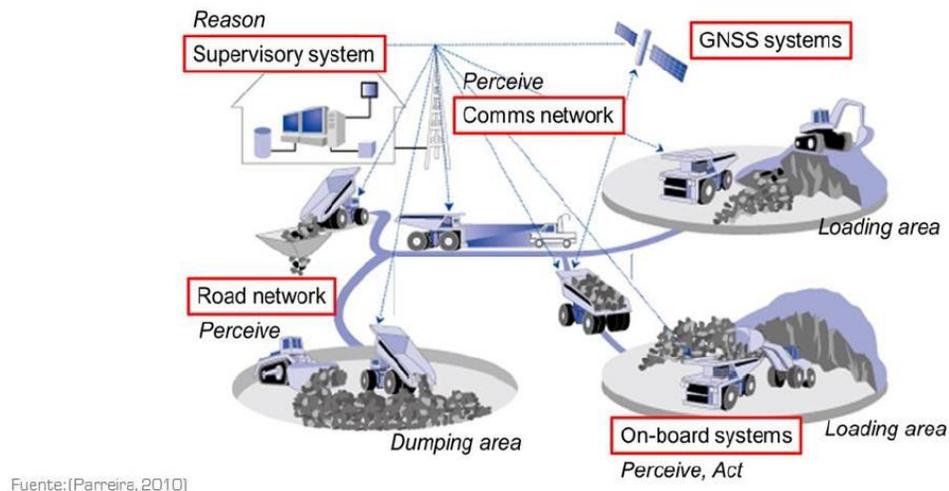


Figura N° 2-2: Diagrama de sistema de acarreo autónomo.

### 2.5.2.1 *Komatsu*

En el caso de los fabricantes, la indiscutible pionera en este tipo de equipos es la empresa japonesa Komatsu, quienes desarrollaron *Front Runner*, su sistema de acarreo autónomo (HAS), que es el primer sistema autónomo para camiones mineros comercializado en el mundo (el 2008).

A continuación, se presenta una línea del tiempo con hitos claves en el desarrollo de tecnologías de camiones autónomos por parte de Komatsu:

Década de los 70 → Surge la idea de un sistema autónomo con el fin de reducir la cantidad de operadores de camiones que trabajaban en las canteras y minas de Japón.

Década de los 90 → Se llevan a cabo pruebas del sistema en canteras y minas, se llega a la conclusión que el sistema de acarreo autónomo no era el más adecuado para las minas japonesas, por lo tanto, se enfoca el desarrollo de tecnología a minas de gran escala del exterior.

1995 → Se realiza una primera prueba de la tecnología desarrollada en una mina de carbón de gran escala en Australia. Hasta ese momento, el sistema sólo era capaz de administrar 4 camiones autónomos, por lo que el nuevo objetivo de la empresa fue aumentar este número de unidades bajo el control del sistema (desarrollo de programa de gestión de flotas).

1996 → La empresa estadounidense *Modular Mining System* (MMS), desarrolladora del sistema de gestión de la flota *DISPATCH*® para equipos mineros, se alía al grupo Komatsu para desarrollar un sistema de acarreo autónomo.

2002 → Se acepta y autoriza el plan de desarrollo del sistema de acarreo autónomo y su uso en grandes minas. El sistema fue desarrollado y probado durante 3 años.

2005 → Se realizan pruebas industriales de una flota de 5 camiones autónomos modelo 930E-AT de 292[t] de capacidad nominal en un sector de prueba de la mina Radomiro Tomic, perteneciente a Codelco y ubicada en la segunda región de Chile. La prueba duró casi 6 meses obteniéndose buenos resultados.

2008 → Komatsu hace formalmente entrega de 11 camiones autónomos a la mina Gabriela Mistral, también perteneciente a Codelco y ubicada en la segunda región de Chile (primera comercialización mundial del sistema de acarreo autónomo).

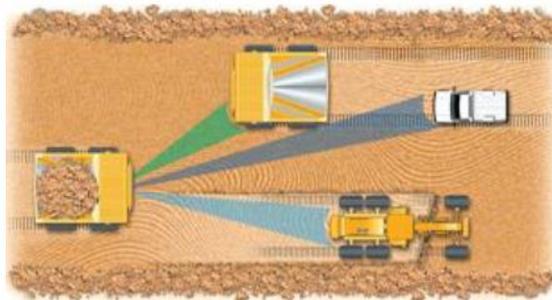
2011 → Se firma acuerdo entre Komatsu y Río Tinto para la entrega de 150 camiones autónomos para sus operaciones de Pilbara en Western Australia.

2016 → Río Tinto declara que posee 71 camiones autónomos Komatsu trabajando en sus operaciones de Pilbara.

El Sistema de Acarreo Autónomo (Autonomous Haulage System: AHS) es el sistema integral propuesto por Komatsu de administración de la flota para minas. Está compuesto por:

a) Elementos a bordo de los vehículos

- i. Antena GNSS: la cual es el mecanismo primario de posicionamiento utilizando las constelaciones GPS. Dado el alto nivel de precisión requeridos, cada equipo tiene instalado un GPS diferencial de alta precisión (HPGPS) que recibe constantemente correcciones desde una estación base GNSS estacionaria.
- ii. *Radio link*: una antena de radio de 2,4 GHz se utiliza para conectar cada camión a la red inalámbrica 802.11, la que permite la comunicación entre el camión y la sala de control.
- iii. ODS – *Radar and Lasers*: utilizados para la detección de objetos que obstruyan el camino con dimensiones mayores a 30 cm (y que no poseen un EMV instalado). La parte delantera del camión utiliza una combinación de radar y láser mientras que la parte trasera utiliza sólo un radar. El rango de visión corresponde a 50 [m] (comúnmente denominado burbuja de seguridad). La diferencia entre el radar y láser radica en la energía utilizada: el radar usa ondas electromagnéticas largas, las cuales no son susceptibles al polvo en suspensión o condiciones climáticas, pero no logran diferenciar objetos pequeños; y el láser de ondas electromagnéticas cortas, las cuales permiten diferenciar objetos de pequeñas dimensiones, pero son susceptibles a la polución y por lo tanto generan falsos positivos.



**Figura N° 2-3: Sistema de detección de obstáculos.**

- iv. Navegación inercial & REG láser: el sistema de navegación inercial, compuesto de un giroscopio, un acelerómetro y sensores de rotación, se utiliza para proporcionar redundancia para la navegación primaria con HPGPS al determinar la posición del camión sobre la base de su posición de partida, la velocidad y rumbo. El sistema está sujeto a errores acumulativos, para esto, se integra adicionalmente un sistema láser guía de camino para mantener el camión en la pista de transporte.
- v. Luces de modo operativo: indican el modo de funcionamiento del equipo: tripulado, autónomo, transición y parada de emergencia.
- vi. Sistema de control de dirección: corresponde al sistema que controla al equipo, el cual a través de sensores y actuadores envían información y reciben instrucciones desde el centro de supervisión, para controlar físicamente el camión (aceleración, frenado, dirección).

b) Sistema de supervisión (*FrontRunner*)

Es un sistema de control de gran escala que permite operar camiones manuales en conjunto con equipos de accionamiento manual (unidades de carga, bulldozers, motoniveladoras, entre otros) y equipos livianos (camionetas). Para una correcta operación, se trabaja en un circuito aislado de producción, llamado Área Autónoma (AT).

El sistema hace uso de todos los elementos a bordo de los equipos para realizar la supervisión para dirigir continuamente a los AHT a puntos de carga y descarga respectivos. Todo el flujo de información es recibido y transmitido mediante un controlador central situado en la sala de control. Este es el responsable de establecer los lugares de carguío y vaciado de los AHT, restricciones de velocidad, condiciones de los caminos, rutas de vaciado en botaderos, stocks y otras variables. Se cuenta además con una gráfica interactiva en tiempo real que representa el área autónoma (AT), la red de caminos, lugares, las posiciones y estados de AHT y equipos tripulados. El controlador utiliza la pantalla para seguir de cerca la operación en el AT y supervisar el funcionamiento de todos los equipos autónomos registrados en el sistema, los operadores de equipos de carguío y equipos auxiliares para confirmar toda la actividad (siempre en contacto por radio).

Por otro lado, con respecto a paradas de emergencia, el controlador puede detener en cualquier momento a los AHT, pulsando el botón que está ubicado en la sala de control o también pueden ser detenidos en terreno a través del botón ubicado en cada uno de los equipos.

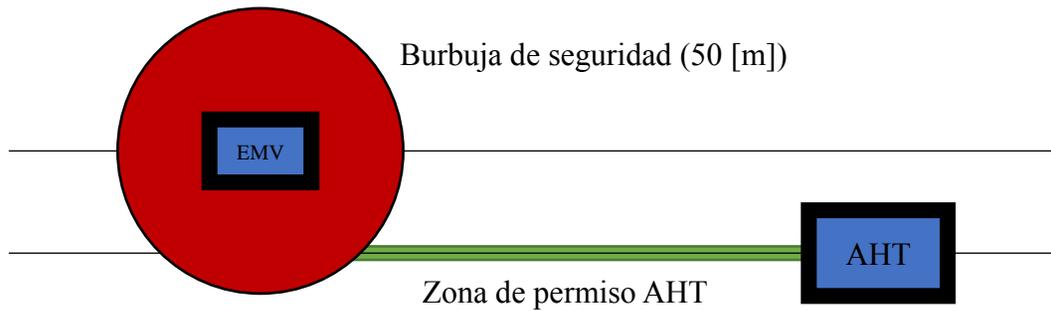
Debido a que el sistema es altamente dependiente de la central de monitoreo que envía constantemente instrucciones, se genera una limitante de procesamiento de información que restringe la cantidad de camiones autónomos que se pueden tener operando paralelamente (máximo 70-80 camiones).

c) Infraestructura y tecnología de soporte

- i. EMV (equipamiento de vehículo manual): montado en todos los equipos operados manualmente en el área de trabajo (equipos de carguío, equipos auxiliares y equipos livianos). El hardware consiste en una *MasterLink Hub*, compuesta por una antena GPS que informa de la posición de equipos, una consola gráfica para saber el estado de la operación y un botón de parada de emergencia.
- ii. Red de comunicaciones inalámbricas: proporciona la comunicación entre el ordenador central y la *MasterLink Hub* a bordo de los AHT y EMV.
- iii. Ordenador Central: ejecuta el software de supervisión (*FrontRunner*) que controla los AHT y permite que el controlador central pueda supervisar y gestionar la toda la operación.
- iv. Base de datos del rajo: de la cual se obtiene información de configuración y en tiempo real del sistema, incluidos las rutas de GPS, localización y levantamiento topográfico de caminos, y especificaciones AHT y EMV y ubicaciones actuales.

- v. Estación de Referencia GPS terrestre: encargada de enviar correcciones diferenciales GPS a AHT y EVM (corregir errores desde los satélites GPS).
- d) Roles y responsabilidades
- i. *Central Controller*: encargado de la integración en la operación de todos los equipos autónomos y manuales que operan en el rajo. Es responsable del control de camiones autónomos, su monitoreo y respuesta a eventos clave (paradas de emergencias, alarmas y alertas), la coordinación de todas las actividades requeridas, informes de producción y la gestión de las personas y vehículos que entran y salen del rajo.
  - ii. *Pit Patroller*: líder de terreno, trabaja en estrecha colaboración con el *central controller*. Corresponde a supervisor de los camiones autónomos, sustituyendo los sentidos y la sensación de un operador, permitiendo operar en las mejores condiciones posibles "en terreno".
  - iii. *Road Network Designer*: rol que se preocupa de que la base de datos que contiene toda la red virtual de la mina, según la cual los camiones pueden navegar, está actualizada.
  - iv. Mantenimiento AHS: debido a la alta complejidad del sistema de los camiones autónomos, se requieren especialistas para la reparación y mantenimiento de estos componentes.
- e) Funciones de seguridad (6 capas)
- i. Barreras duras funcionales: verificaciones cruzadas entre el sistema detección de obstáculos y el sistema de detección de colisiones, sistema de burbuja de seguridad y reconocimiento en línea de todos los equipos.
  - ii. Automatización: parada por pérdida de comunicación o posicionamiento.
  - iii. Simplificación y estandarización: generación de protocolos como el de evasión de obstáculos y definición de perímetro de seguridad de AHS.
  - iv. Recordatorios, doble chequeos y verificaciones: paradas de emergencia.
  - v. Reglas y procedimientos: procedimientos de operación.
  - vi. Educación y entrenamiento: capacitación Komatsu.

La lógica detrás del sistema Komatsu toma en consideración una burbuja virtual de protección de 50 metros alrededor de cada uno de los equipos en el área autónoma (autónomos y manuales), con la finalidad de disminuir los riesgos asociados a potenciales colisiones entre los equipos.



**Figura N° 2-4: Burbuja de seguridad Komatsu.**

En el ejemplo, se muestra un AHT transitando en dirección opuesta a un equipo operado manualmente (EMV). Cuando el camión traspase la burbuja de seguridad del EMV, se identifica al equipo y activa el protocolo de paso con vehículos en modo manual y disminuirá su velocidad a 30 [km/hr].

Las empresas que destacan en el uso de esta tecnología son Codelco, la cual cuenta actualmente con una flota de 18 de estos camiones operando en su mina a cielo abierto de cobre Gabriela Mistral (Chile), y Río Tinto, la cual tiene un acuerdo con Komatsu para la entrega de 150 camiones autónomos 930E para sus operaciones de hierro en Pilbara (Australia), como parte de su programa “Mina del Futuro” de los cuales 71 se encuentran en operación.

#### 2.5.2.2 Caterpillar

A continuación, se presenta una línea del tiempo con hitos claves en el desarrollo de tecnologías de camiones autónomos por Caterpillar:

1996 → En la MINExpo14 Caterpillar mostró un video de 2 camiones autónomos trabajando en una cantera en Texas anunciando su entrada al mercado de flotas autónomas. En el centro de demostraciones Tinaja Hills se presentó un camión autónomo 777C.

2010 → Caterpillar realiza pruebas con una flota de 4 camiones autónomos modelo 793 en Arizona. El software desarrollado para operar esta tecnología corresponde a Cat® MineStar™ Command.

2011 → Se realizan pruebas industriales de tres camiones (dos 793F de 227 [t] y un 793D de 218 [t]) enviados a trabajar junto a un cargador frontal 994F (operado manualmente) a una prueba a gran escala en la mina de carbón Navajo, Nuevo México, perteneciente a BHP Billiton.

2011 → Fortescue Mining Group solicita 12 camiones 793F como piloto para dos minas de hierro en Pilbara, Australia.

2013 → Caterpillar comunica que completa sus pruebas industriales (21 meses de operación), durante la cual sus tres camiones habían movido 2,3 [Mm3] de material. En base a la información colectada y correcciones al sistema, Caterpillar aseguró obtener mejoras en los tiempos de ciclos y porcentajes de utilización de camiones, además de la intención de instalar flotas más grandes con fines comerciales.

2017 → FMG declara tener una flota de 54 camiones autónomos 793F en sus operaciones en Pilbara, Australia.

El sistema de acarreo autónomo propuesto por Caterpillar ha tenido menor experiencia práctica que el Komatsu, por lo que se cuenta con menor información. El sistema se compone de:

a) Elementos a bordo

- i. Antenas GPS de alta precisión (HPGPS): proveen información sobre la posición de los camiones y permite trazar todas las rutas posibles de transporte en base a datos satelitales.
- ii. Transmisor de radio: red inalámbrica (que trabaja con los sistemas *Command* y *Proximity Awareness*) a través de la cual existe un flujo continuo de datos sobre la ubicación y velocidad de cada uno de los camiones y sobre la disponibilidad del cargador, evitando así las colas y los atrasos asociados.
- iii. Sistema de detección de obstáculos *Lidar* (trabaja con el sistema *Detect*): el sistema *Lidar* tiene mayor capacidad de detección de objetos, pero es sensible a las condiciones ambientales que el radar, por lo que eventualmente genera mayor cantidad de falsos positivos. El sistema funciona en base a una “alformbra de seguridad” (se prioriza la información de sensores delanteros y traseros en comparación a los laterales). Si los sensores del sistema de detección de obstáculos detectan algún vehículo de transporte o persona dentro del área de transporte de los camiones autónomos, estos se detienen inmediatamente.

b) Sistema de supervisión (*Command*)

Es un sistema de control de gran escala que permite una operación segura y eficiente entre flotas de camiones autónomos, equipos de accionamiento manual (unidades de carga, bulldozers, motoniveladoras, entre otros) y equipos livianos (camionetas).

Lo que caracteriza a este *software* es que cada equipo autónomo lo tiene instalado en su *core*, individualmente o en grupos pequeños de equipos, por lo que la toma de decisiones respecto a la conducción, la velocidad y la aceleración necesaria es independiente para cada unidad.

El sistema *Command* es compatible con la suite *MineStar* de CAT por lo que permite hacer uso del resto de los sistemas sin problema alguno.

Haciendo uso de la señal GPS y una red inalámbrica, el sistema de administración de la flota envía información a todos los equipos en la mina, incluyendo equipos de servicio y vehículos operados manualmente (*Fleet system*). El mapa de la mina se actualiza constantemente y, mediante algoritmos computacionales, el sistema determina la ruta

óptima para cada camión. Adicionalmente, un operador puede intervenir manualmente en el sistema para enviar a un camión a una mantención programada o a cargar combustible.

El operador, trabajando en una sala de control puede ordenar la detención de equipos (en caso de emergencia) y puede intervenir para enviar a un camión a una mantención programada y a cargar combustible.

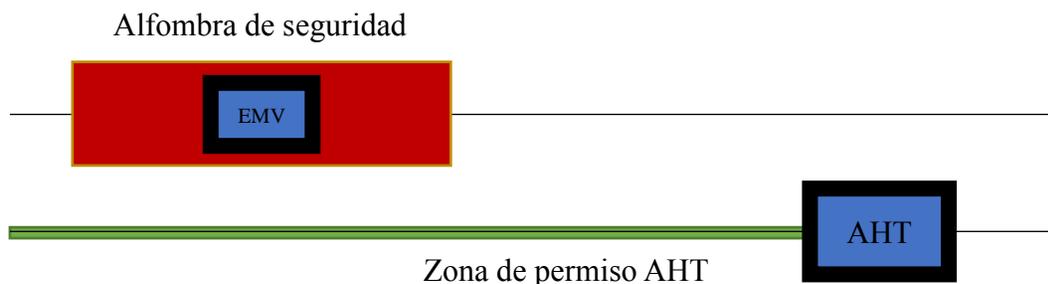
c) Roles y responsabilidades

- i. *Minestar controller*: realiza la integración entre todos los equipos autónomos y manuales que operan en el rajo. Es responsable de la asignación de camiones autónomos a distintos frentes y destinos dependiendo del plan de producción, su supervisión y respuesta a eventos clave (paradas de emergencia, alarmas y alertas), la coordinación de todas las actividades requeridas, informes de producción y la gestión de las personas que entran y salen del rajo.
- ii. Supervisor de terreno: Este supervisor trabaja en estrecha colaboración con el *Minestar Controller* para llevar a cabo las actividades del sistema requeridas al interior del rajo. Similar al *Pit Controller*, le corresponde supervisar los camiones autónomos, sustituyendo los sentidos y la sensación de un operador, permitiendo operar en las mejores condiciones posibles "en terreno".
- iii. *Mine Network Builder*: se ocupa de analizar y actualizar la base de datos que contiene toda la red virtual de la mina, según la cual los camiones pueden navegar. Es responsable de asegurar la red de caminos y el apoyo de las actividades auxiliares descritas en el plan diario de operaciones de la mina.
- iv. Mantenimiento AHS: debido a la alta complejidad del sistema de los camiones autónomos, se requieren especialistas para la reparación y mantenimiento de estos componentes.

d) Capas de seguridad (5 capas)

- i. Barreras duras funcionales: sistema detección de objetos, sistema de "alfombra" de seguridad y reconocimiento en línea de todos los equipos.
- ii. Automatización: parada por pérdida de comunicación o posicionamiento.
- iii. Recordatorios, doble chequeos y verificaciones: paradas de emergencia general mina, activada en equipo por sector y activada por peatón por sector, y perímetro de seguridad AHS.
- iv. Reglas y procedimientos: procedimientos de operación.
- v. Educación y entrenamiento: capacitación CAT básica.

La lógica tras el sistema CAT considera una zona de seguridad para cada uno de los equipos en el área autónoma (manuales y autónomos). Las dimensiones mínimas del área de transporte corresponden a 1.7 veces el ancho del equipo (aproximadamente 17 m para un camión 797F AT). Equipos u objetos fuera de esta zona de seguridad no influyen en el comportamiento del camión.



**Figura N° 2-5: Zona de seguridad CAT.**

En el ejemplo, se muestra un AHT transitando en dirección opuesta a un equipo operado manualmente (EMV). Dada la trayectoria propuesta, el camión no disminuirá su velocidad cuando pase al lado del EMV (seguirá su curso normal), ya que el sistema asume que no existe riesgo de colisión.

Las principales empresas que cuentan con esta tecnología en sus operaciones son BHP Billiton, la cual ha puesto en marcha una flota de 12 camiones autónomos 793F en su mina Jimblebar de hierro, y Fortescue Metals, la cual que implementó en el proyecto Salomon una flota de 6 camiones 793F, ambas operaciones en Pilbara (Australia).

### 2.5.2.3 Comparación entre sistemas autónomos Komatsu y Caterpillar

En primer lugar, en experiencia práctica, la tecnología Komatsu tiene mayor madurez, alcanzando casi 10 años de trabajo con su modelo 930E. Por otro lado, la tecnología Caterpillar ha crecido exponencialmente su presencia en el mercado con implementaciones de su modelo 793F.

En segundo lugar, analizando los sistemas de supervisión de ambas tecnologías autónomas, se tiene que cumplen funciones similares de administración de las actividades. Sin embargo, los modos en que operan son distintos. El sistema Komatsu concentra casi la totalidad de las decisiones en el centro de control, por lo que se requiere de una constante comunicación con los camiones autónomos que poseen un bajo nivel de complejidad. El sistema Caterpillar por otro lado, tiene instalado el sistema a bordo de sus equipos, permitiendo la comunicación entre estos, y haciéndolos más independientes de la sala de control. Es esta característica que hace que la tecnología Komatsu tenga una restricción en cuanto a la cantidad de equipos operando simultáneamente frente a la tecnología CAT que no la tiene.

Un factor interesante a considerar es la posibilidad de interactuar con otros *software*. La tecnología Caterpillar tiene capacidad de integración y versatilidad con la *suite* de productos MineStar (Terrain, Detect, Fleet y Health). Komatsu, en cambio solo posee integración de la versión 3 FrontRunner con Dispatch versión 6.

En cuanto a la lógica de detección de obstáculos, CAT tiene integrado un sistema que tiene menor sensibilidad que el Komatsu por lo que puede haber objetos que no reconozca. Por otro lado, la tecnología Komatsu considera una evasión de obstáculos automática, mientras que en la

tecnología CAT, el operador debe hacer la maniobra a través de la *suite MineStar* con el *software Controller*.

El último factor a considerar es la distancia de seguridad de los equipos. El sistema Komatsu es bastante robusto con una burbuja de seguridad de 50 [m] que no requiere de protocolos de escolta adicionales. El sistema Caterpillar, en cambio, considera una zona de seguridad menor que permite que dos equipos enfrentados no requieran disminuir la velocidad, pero requieren de protocolos de escolta dependientes de la disciplina operativa.

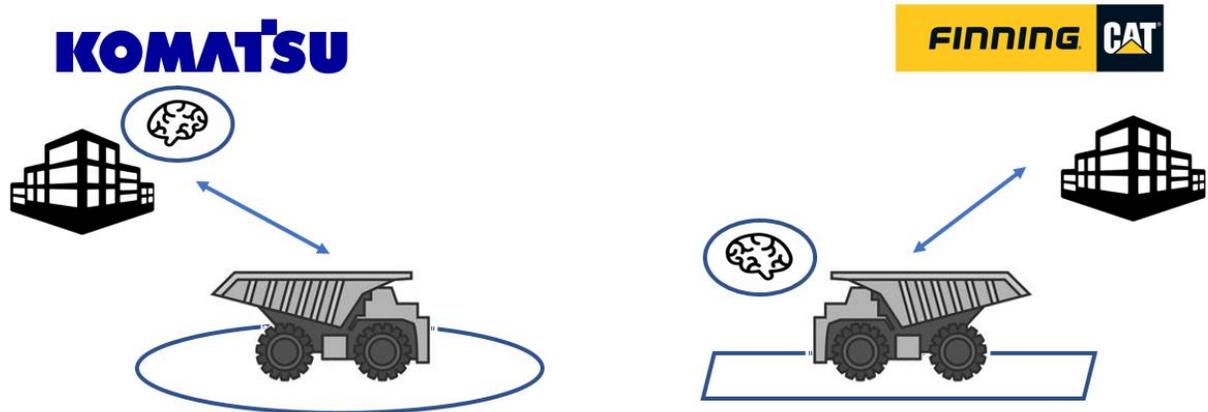


Figura N° 2-6: Representación gráfica de las diferencias entre las tecnologías CAT y Komatsu.

#### 2.5.2.4 Desarrollos futuros: Hitachi

En 2015, Hitachi anunció que empezaría a desarrollar un proyecto de camiones autónomos en conjunto con *Wenco International Mining Systems* (*Hitachi Construction Machinery*, 2015). En 2016 se declaró que se habían realizado las pruebas de campo iniciales con éxito en la mina de carbón Meandu en Queensland con una flota de tres camiones EH5500AC-3 de 296 [t], sin embargo, aún quedaban desafíos incompletos en lo que el software respecta, la interacción entre equipos, la coordinación de actividades y la optimización del sistema de cruces en rutas. A fines del año 2017 se concretaron las pruebas en Meandu con éxito y se anunciaron pruebas en operaciones mineras activas.

#### 2.5.2.5 Desarrollos futuros: Leica Geosystems / ASI

*Leica Geosystems*, a pesar de no ser un fabricante de equipos mineros, desarrolló un *software* (J3) que se integra a flotas manuales de camiones mineros para proveer una solución autónoma a proyectos de minería en superficie. Este producto fue llevado a cabo en conjunto con ASI (*Autonomous Solutions Incorporated*) quien dispuso su módulo de control autónomo *Mobius* para ser incorporado al sistema de gestión de flotas *Jigsaw* de *Leica Geosystems* en 2011.

ASI cuenta con experiencia en la autonomía de equipos utilizados en distintos rubros industriales como lo es la agricultura y sistemas de seguridad. En 2006 junto con Phelps Dodge ingresa a proporcionar soluciones autónomas para camiones y bulldozers de la industria minera.

El sistema autónomo propuesto, ofrece un sistema único independiente para camiones de carga rígidos y camiones articulados (ADT). Actualmente la solución está disponible para equipos

de transporte de material medianos como lo son los modelos de camiones rígidos Caterpillar 777D y los modelos de camiones articulados Komatsu HM400 y Volvo A40.

El módulo *Mobius* de ASI ofrece opciones de operación asistida, tales como:

- ❖ *Tele-Op* (telecomandado): control de vehículos por un operador desde una ubicación remota.
- ❖ *Cruise Control* (control crucero): ajusta automáticamente velocidad del vehículo dadas las condiciones de terreno en diferentes secciones de la red de caminos.
- ❖ *Auto pilot* (autonomía): una solución para desplazamiento automático del vehículo través de la red de caminos previamente definida.

#### 2.5.2.6 *Desarrollos futuros: Liebherr*

Liebherr, a diferencia de Komatsu y Caterpillar, optó por asociarse con ASI, integrado sus equipos al sistema de control autónomo Mobius (IM: *international mining*, 2017). La apuesta de este fabricante consta en tener equipos que sean más libres y flexibles a ser manipulados por distintos sistemas autónomos ofrecidos en el mercado. Sin embargo, a futuro, la empresa quiere desarrollar una solución autónoma específica para sus equipos, lo cual pretende lograrlo a través de la asociación con *Perrone Robotics* (PRI) y su plataforma MAX. El objetivo de esta nueva asociación es presentar a la industria el camión minero autónomo con mayor capacidad del mercado.

### 2.5.3 **Simulaciones y experiencia previa en operaciones con flotas de equipos de transporte autónomos**

A continuación, se presentan algunas variables que son afectadas por la introducción de transporte autónomo y su impacto en las operaciones, a partir de simulaciones o experiencia de uso.

#### 2.5.3.1 *Disponibilidad mecánica de los equipos*

Corresponde a la porción de tiempo del total del tiempo de operación, durante el cual un equipo está en condiciones electromecánicas óptimas de realizar sus funciones específicas (1).

Al carecer de un operador humano los equipos autónomos presentan menor variabilidad en la velocidad de manejo (evitando aceleraciones y desaceleraciones innecesarias producto de capacidades o estado de ánimo del operador), trabajando bajo las condiciones para las cuales fue diseñado. Esta consistencia en la operación de los equipos también provocaría una disminución en los niveles esperados de desgaste y fallas de los equipos.

Por otro lado, los equipos autónomos son más sofisticados, pues incorporan un mayor número de sistemas para su correcta operación, lo cual se traduce en una mayor cantidad de posibles focos de fallas y, por lo tanto, un aumento en el tiempo que toma realizar las mantenciones.

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), se tiene la siguiente disponibilidad mecánica de equipos autónomos<sup>1</sup>.

**Tabla N° 2-3: Comparación disponibilidad mecánica de camiones manuales vs autónomos.**

		Manual	Autónomo	Diferencia
<b>Horas en Mantención</b>				
Media Mantenciones Planeadas	[h/d/camión]	2.6	2.8	0.2
Media Mantenciones no Planeadas	[h/d/camión]	1.3	1.4	0.1
<b>Horas Hábiles y Horas en Mantención</b>				
Horas Hábiles (HH)	[h]	24.0	24.0	
Horas en Mantención (HM)	[h]	3.9	4.2	0.3
<b>Disponibilidad Mecánica</b>	[%]	83.7	82.4	-1.3

Se observa que, en este caso, la implementación de esta tecnología tiene un impacto negativo en la operación (-1.3%), es decir, resultan disminuir la disponibilidad de equipos.

### 2.5.3.2 Utilización de los equipos

Corresponde a la porción de tiempo en el cual el equipo está en condiciones de operar y está asignado a un operador (2).

Al carecer de un operador humano, un equipo de transporte autónomo, se evitan pérdidas de tiempos asociadas a las necesidades humanas, como cambios de turnos, pausas higiénicas y colaciones.

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), se tiene la siguiente utilización de equipos autónomos.

**Tabla N° 2-4: Comparación utilización de camiones manuales vs autónomos.**

		Manual	Autónomo	Diferencia
<b>Horas de Transporte, Cambios de Turnos, Colaciones y Demoras</b>				
Media Cambio de Turno	[h/d/camión]	0.4	0.0	-0.4
Media Colaciones	[h/d/camión]	1.9	0.0	-1.9
Media Demoras Procesos	[h/d/camión]	2.2	2.1	-0.1
Media Horas de Transporte Total	[h/d/camión]	15.6	17.6	2
<b>Horas Operativas y Horas de Reserva</b>				
Horas Operativas (HO)	[h]	15.6	17.6	2.0
Horas de Reserva (HR)	[h]	4.5	2.1	-2.4
<b>Utilización</b>	[%]	77.7	89.2	11.5

El escenario con camiones autónomos en este caso resulta más favorable con una diferencia de 11.5% de mayor utilización en el caso de camiones autónomos.

<sup>1</sup> Para mayor información revisar anexos donde se encuentra el detalle del modelo de simulación utilizado.

Analizando la experiencia práctica del uso de camiones autónomos, en la División Gabriela Mistral de Codelco, se declaró que estos camiones estaban operando con una utilización del 85%, lo cual correspondía a una mejora del 15% con respecto a la situación base (Portal Minero, 2013).

### 2.5.3.3 *Tiempos de ciclo*

Como se mencionó anteriormente, los equipos autónomos son capaces de dar una mayor consistencia a la operación en una faena (menor cantidad de eventos de aceleración y desaceleración provocadas por conductores y por lo tanto menor variabilidad de velocidades de manejo) junto con una mejor coordinación de actividades (disminuyendo tiempos en cola). Estas cualidades permiten disminuir los tiempos de ciclo de carguío y transporte.

En el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), basados en datos reales de una faena minera, se definen tres tipos de conductor de acuerdo con sus conductas de manejo (velocidad, aceleración, entre otros): pasivo normal y agresivo. Los camiones autónomos se modelan considerando una agresividad normal, pero considerando con baja variación de velocidad y aceleración controlado por el sistema de detección de obstáculos y navegación integrado en los equipos. De esta manera se fija la velocidad de estos camiones como un 5% menor, cuando está cargado, y un 10% menor, cuando está vacío, comparada con un conductor de conducta normal. A continuación, se presentan los perfiles de velocidad de cada tipo junto con el tiempo de ciclo asociado a la ruta establecida en la simulación:

**Tabla N° 2-5: Comparación promedio y desviación estándar de velocidad de camiones manuales (por tipo de conductor) vs autónomos.**

Velocidad Promedio Camión y Desviación Estándar de las Mismas		Manual			Autónomo
		Tipo de Conductor			
		Pasivo	Normal	Agresivo	
Velocidad Cargado Promedio	[km/h]	16.7	17.4	18.1	16.6
Desv. Est. Velocidad Cargado	[km/h]	1.27	1.49	1.65	1.05
Velocidad Vacío Promedio	[km/h]	24.6	27.4	29.1	24.8
Desv. Est. Velocidad Vacío	[km/h]	1.04	0.89	0.95	0.26
<b>Tiempo de Ciclo Promedio</b>	[min]	<b>51</b>			<b>47.5</b>

A pesar de que la velocidad sea en promedio menor que los camiones manuales, los camiones autónomos presentan tiempos de ciclo menores dada la menor variabilidad de aceleraciones manteniendo velocidades constantes, lo que permite alcanzar una mejor coordinación de actividades disminuyendo interacciones entre equipos y tiempos de cola en espera. En promedio los tiempos de ciclo simulados resultan ser un 7% menores.

### 2.5.3.4 *Productividad de los equipos*

Corresponde a la relación entre la cantidad de productos obtenida y los recursos utilizados para obtener dicha producción, en este caso material movilizad y el tiempo utilizado para su transporte (4).

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), se tiene la siguiente productividad de equipos autónomos.

**Tabla N° 2-6: Comparación productividad de camiones manuales vs autónomos.**

		<b>Manual</b>	<b>Autónomo</b>	<b>Diferencia</b>
<b>Número de Ciclos y Carga Útil</b>				
Tiempo de Ciclo	[min]	51.0	45.7	4.3
Media N° Ciclos	[ciclos/d]	18.9	23.1	4.2
Media Carga Útil	[t/ciclo]	223.9	222.1	-1.8
<b>Productividad</b>	[t/d]	4,231	5,130	899

A pesar de que la media de la carga útil sea menor con la tecnología de camiones autónomos, la media de número de ciclos hace que la productividad mejore de manera considerable (21% mayor que el caso de camiones manuales).

Según Komatsu, la experiencia práctica del uso de camiones autónomos en División Gabriela Mistral de Codelco ha significado un aumento en la productividad de 25% (Minería Chilena, 2014). En las operaciones de Pilbara, Río Tinto declaró que su flota de camiones autónomos Komatsu presentó una mayor productividad promedio de 14% (Río Tinto, 2016).

Fortescue Mining Group manifestó en 2017 que su flota de camiones autónomos CAT 793F había aumentado la productividad en un 20% comparada con su flota de camiones manuales en sus operaciones en Pilbarra (Diginomica, 2017).

#### 2.5.3.5 *Incertidumbre operacional*

En una operación minera con camiones manuales, la experiencia, la capacidad y el humor de cada operador influirán en el desarrollo de su trabajo. De esta manera, pueden existir diferencias importantes entre turnos de día y de noche, durante un mismo turno y en la toma de decisiones por parte de los trabajadores. Esto corresponde a un factor que le agrega variabilidad al desarrollo de la operación.

Los equipos autónomos, en comparación con los manuales, presentan una mayor continuidad en su operación (siempre se mueven a la misma velocidad, no necesitan tiempos de colaciones o cambios de turno) y en su toma de decisiones (ante las mismas circunstancias siempre se tomará la misma decisión).

#### 2.5.3.6 *Consumo de combustible*

A diferencia de operaciones mineras con camiones manuales, en las cuales los operadores humanos tienden a moverse de un destino a otro a máxima velocidad y con continuas aceleraciones y desaceleraciones, los camiones autónomos tienden a movilizarse a velocidades más constantes. Esto implica una mayor eficiencia en el consumo de combustible.

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), se tiene el siguiente consumo de combustible en equipos autónomos.

**Tabla N° 2-7: Comparación consumo combustible de camiones manuales vs autónomos.**

Consumo de Combustible por Etapa del Ciclo	Manual			Autónomo	
	Tipo de Conductor				
	Pasivo	Normal	Agresivo		
En Espera	[lts/h]	26.6	27.0	26.8	27.0
Cargado	[lts/h]	384.3	384.2	384.4	381.5
Vacío	[lts/h]	80.8	79.3	77.8	69.5
Total Ciclo	[lts/ciclo]	184.8	180.1	183.1	173.2
Consumo de Combustible	Manual			Autónomo	
Por Ciclo	[lts/ciclo]	182.4			173.2
Por Tonelada	[lts/t]	0.83			0.78

Se tiene que el caso con camiones autónomos resulta en una importante disminución del consumo de combustible (6% por tonelada movilizada).

Con respecto a información práctica, en División Gabriela Mistral de Codelco se ha declarado una disminución en el consumo de este insumo, pero no se han presentado valores concretos.

#### 2.5.3.7 Vida de los neumáticos

A medida que las operaciones mineras se han ampliado y, con el fin de reducir costos específicos (por tonelada), han agrandado sus equipos, la demanda por neumáticos ha ido en aumento. Existen dos problemáticas a sobre las cuales actuar: el costo de insumos de los neumáticos y la cantidad de desechos producidos cuando estos llegan al término de su vida operativa. El desafío entonces es alargar la vida útil de los neumáticos.

El incorporar tecnología autónoma de transporte permite, como se ha expuesto anteriormente, que lo camiones se muevan a velocidades más constantes por exactamente rutas definidas y estáticas, lo cual debiera contribuir a disminuir la tasa de desgaste de los neumáticos. Otro aspecto relevante que integran estos camiones autónomos es la clasificar las rutas según estado de manera de movilizarse a una menor velocidad a través de rutas complejas.

Según los resultados obtenidos con el modelo de simulación de Juliana Parreira (Parreira, 2013), se tiene el siguiente desgaste de neumáticos en equipos autónomos.

**Tabla N° 2-8: Comparación desgaste neumáticos de camiones manuales vs autónomos.**

Desgaste de Neumáticos por Etapa del Ciclo	Manual			Autónomo	
	Tipo de Conductor				
	Pasivo	Normal	Agresivo		
En Espera	[mm/h]	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
Cargado	[mm/h]	0.0303	0.0306	0.0304	0.0298
Vacío	[mm/h]	0.0066	0.0073	0.0067	0.0063
<b>Total Ciclo</b>	[mm/ciclo]	0.0150			0.0140

Se tiene que en el caso con camiones autónomos se tiene una disminución de desgaste de neumáticos correspondiente a un 6.6% con respecto al caso con camiones manuales.

La experiencia práctica en División Gabriela Mistral de Codelco ha demostrado un aumento en el rendimiento de neumáticos en su flota autónoma de 40%. Se ha declarado que las flotas autónomas han alcanzado sobre 9.000 horas de vida útil en comparación con las 4.500 a 5.500 horas en camiones manuales de 300 [t] (Codelco Noticias, 2016).

#### 2.5.3.8 *Costos operacionales*

A modo de resumen, se presentan las posibles reducciones en costos de operación que podría implicar la implementación de tecnologías autónomas:

- ❖ **Costos salariales:** debido a que las flotas autónomas carecen de operadores humanos, se produce una reducción en la cantidad de personal requerido. También se debe considerar que las operaciones mineras pasan a ser comandadas desde centros de control que pueden ubicarse en cualquier lugar del mundo con conexión a la red, alejados de la faena y próximas a centros urbanos, reduciendo costos en campamentos y/o transporte a la mina.  
Analizando experiencia práctica, se tiene que, en División Gabriela Mistral, la flota de 18 camiones autónomos es operada por un solo trabajador desde la sala de control.
- ❖ **Costo de mantenimiento y reparación:** costos asociados a mantenciones planificadas y no planificadas. Como no se tiene información práctica, sólo una simulación, no se sabe con certeza cómo puede variar el costo a la operación.
- ❖ **Costo de consumo de combustible:** el caso de camiones autónomos, anteriormente presentado, implica que debiese disminuir los costos de combustibles.
- ❖ **Costo de insumos de neumáticos:** como se vio previamente, los camiones autónomos presentan una disminución en el desgaste de neumáticos y en División Gabriela Mistral se obtuvo un rendimiento 40% mayor al del caso con camiones manuales aumentando significativamente la vida útil de este insumo.

Considerando los costos operacionales totales, se tiene información de la empresa Río Tinto, la cual declaró una reducción de costos de un 13% en transporte por camiones autónomos frente a flotas manuales en minería de hierro en Pilbara, Australia (Río Tinto, 2016).

Se debe mencionar que el costo inicial de inversión para esta tecnología resulta ser mayor, no sólo por la adquisición de equipos sino también por la necesidad de habilitar un sistema de telecomunicaciones y posicionamiento de infraestructura, además de requerir capacitación de personas que vayan a operarlos.

#### 2.5.3.9 *Seguridad*

La implementación de tecnologías autónomas retira a operadores de la faena misma a salas de control, disminuyendo riesgos asociados a la operación misma. Por otro lado, mejora las

condiciones laborales de trabajadores que ya no tienen la necesidad de trasladarse a la mina, trabajando desde oficinas cómodas en centros urbanos con accesos a servicios.

Finalmente, se debe destacar que el sistema de detección de obstáculos de los camiones autónomos hace difícil que estos sufran de accidentes (reduciendo la velocidad o deteniéndose dependiendo del caso). Además, se clasifican rutas según estado, lo cual les permite escoger velocidades acordes al camino, que disminuyen la probabilidad de inconvenientes.

## **2.6 Estudio conceptual de la implementación de un sistema de camiones autónomos en distrito Minera Escondida**

El reporte de estudio de la implementación de tecnologías de transporte autónomo elaborado por Haultrax para Minera Escondida, corresponde a un análisis de la factibilidad técnica de instalar este avance a la extracción de material desde los distintos depósitos de mineral presentes en el distrito: Escondida, Escondida Norte, Pampa Escondida, Chimborazo, Pinta Verde y el proyecto *Sulphide Leach Reprocessing*. Este informe también presenta estimaciones de lo que son los beneficios y costos económicos de cada caso proyecto.

Al igual que en la memoria, en el estudio se analiza el utilizar equipos de transporte autónomo de gran capacidad como lo son el CAT 797F y Komatsu 980E. En esta sección se presentan los resultados más relevantes para los casos de Escondida y Escondida Norte.

### **2.6.1 Análisis conceptual técnico**

A continuación, se presentan los análisis más importantes acerca de la infraestructura y limitaciones propias del sistema autónomo.

#### *2.6.1.1 Diseño de caminos*

Considerando los estándares del manual de caminos de Minera Escondida, que se toman en consideración para los diseños de cada fase, se tienen los siguientes valores para cada tipo de rampa:

a) Caminos horizontales

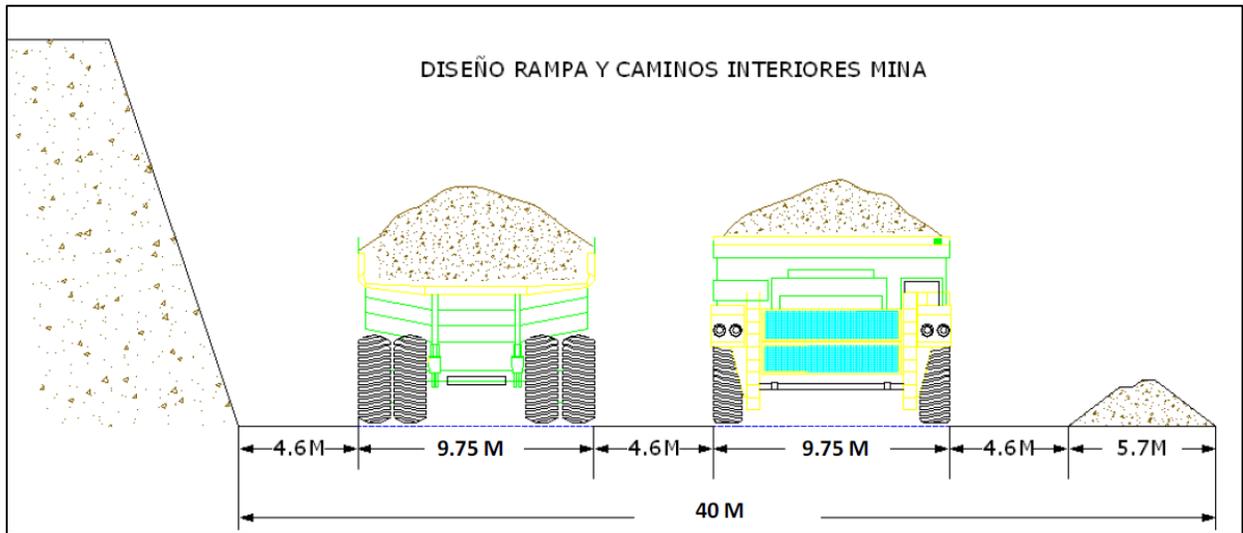


Figura N° 2-7: Ancho de rampa para caminos horizontales, considerando camiones manuales CAT 797F.

b) Caminos con pendiente

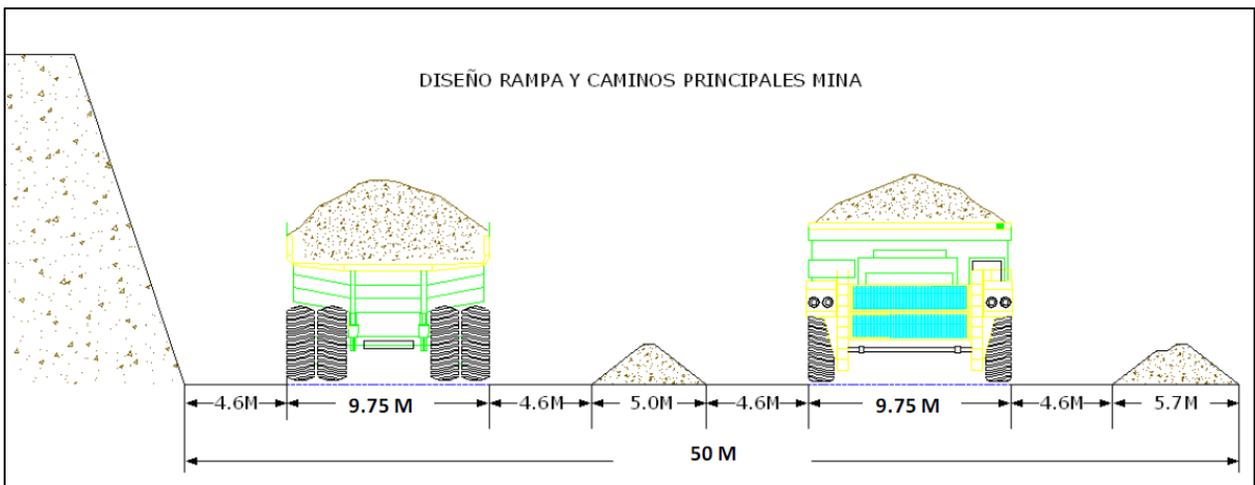


Figura N° 2-8: Ancho de rampa para caminos con pendientes, considerando camiones manuales CAT 797F.

c) Caminos sin pared lateral

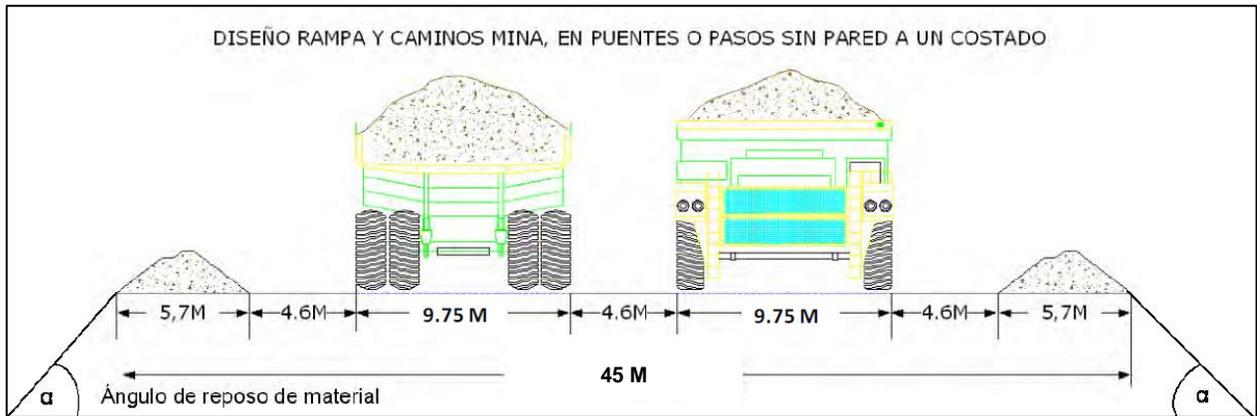


Figura N° 2-9: Ancho de rampa para caminos sin pared lateral, considerando camiones manuales CAT 797F.

Para los camiones autónomos analizados se tiene los siguientes requerimientos.

Tabla N° 2-9: Resumen análisis de caminos para rajo Escondida y Escondida Norte.

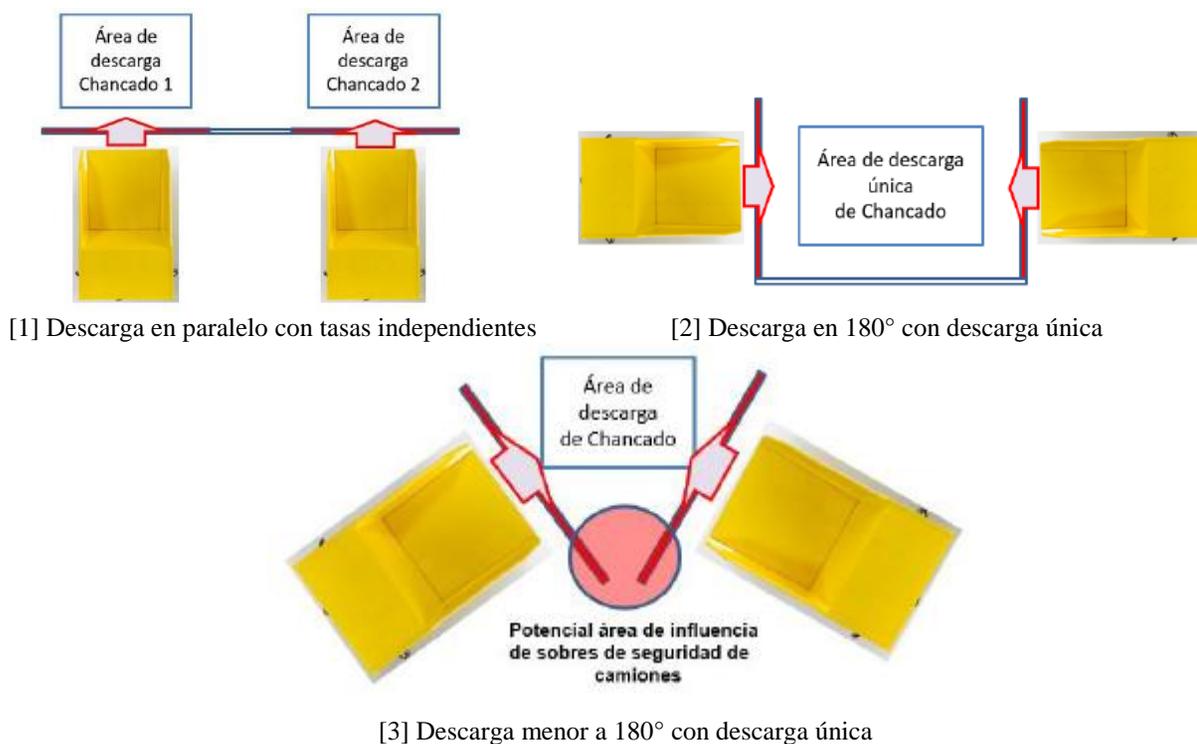
Escenarios	Ancho camión [m]	Mínimo ancho requerido [m]	Ancho real disponible [m]	Ruta MEL horizontal	Ruta MEL con pendiente
CB: CAT 797F-M	9.7	29	~33	Sin restricciones	Sin restricciones
CP: CAT 797F-AT	9.7	33*	~33	Sin restricciones	Posibles restricciones por derrames
CP: KOM 980E-AT	9.6	33*	~33	Sin restricciones	Posibles restricciones por derrames

El reporte indica que los actuales estándares para diseño de fase podrían presentar restricciones para el uso de camiones autónomos sólo en el caso de los caminos con pendientes.

### 2.6.1.2 Plataforma de chancado

Otro punto que considerar, para analizar la implementación de tecnología autónoma de camiones, es la operatividad de la plataforma de Chancado. El sistema autónomo proyecta trayectorias de los camiones, por lo que cuando dos camiones retroceden hacia un mismo punto, hará que las burbujas de seguridad se interfieran entre sí y uno de los camiones se detenga a la espera que el otro se retire.

Existen diversos modelos de descarga en chancado:



**Figura N° 2-10: Gráfica representativa de modelos de descarga en chancado.**

De los modelos de descarga presentados, los que permiten mejor desempeño de una flota autónoma son los modelos [1] y [2] ya que minimizan la interacción de las burbujas de seguridad.

En los cinco chancadores instalados se tiene el modo de descarga [3]. A continuación, se muestran los anchos disponibles por caso.

**Tabla N° 2-10: Resumen análisis plataformas de Chancado de operación actual MEL.**

Plataforma	Ancho máximo camión [m]	Mínimo ancho requerido [m]	Ancho real disponible [m]	Comentarios
Ch 1	9.7	~14	~11	Potencial restricción
Ch 2	9.7	~14	~11	Potencial restricción
Ch 3	9.7	~14	~14	Sin restricciones
Ch 4	9.7	~14	~11.4	Potencial restricción
Ch 5	9.7	~14	~11.5*	Potencial restricción

Como se puede observar, la única plataforma sin restricciones corresponde a la del chancador 3. Para las restantes, se debe tener en cuenta analizar el impacto de esta configuración y el cambiar el modo de descarga de la plataforma.

### 2.6.1.3 Truck shop

Un sistema autónomo necesita minimizar la interacción de personal con equipos en modo manual. En el caso del Taller de camiones, por seguridad, los equipos deben ser ingresados a las bahías de mantenimiento en modo manual. Para esto, se requiere de la construcción de dos áreas de traspaso de camiones y definir protocolos de ingreso:

- d) Desde modo autónomo a modo manual
- e) Desde modo manual a modo autónomo

### 2.6.1.4 Análisis de diseño para comunicaciones

Para operar un sistema autónomo de camiones, se requiere de un sistema de comunicaciones robusto de modo que se tenga un óptimo nivel de comunicaciones con la central de despacho en todo momento.

El reporte analiza las dimensiones y profundidades de los rajos presentes actualmente en la operación.



Figura N° 2-11: Dimensiones y profundidad de rajo Escondida.

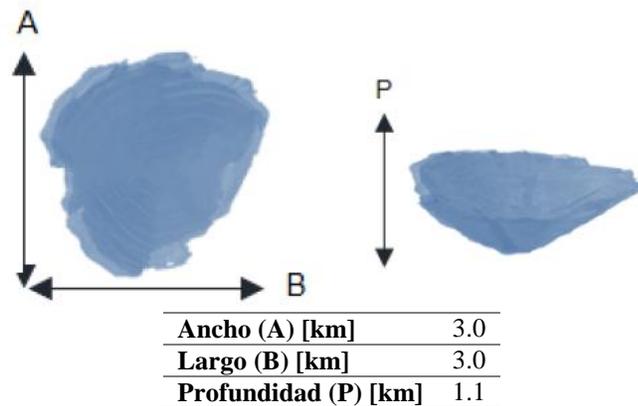


Figura N° 2-12: Dimensiones y profundidad de rajo Escondida Norte.

En general no se observan restricciones especiales para el distrito MEL. Sólo se debe tener en consideración el reforzamiento de la red de comunicaciones al momento de que el rajo Escondida aumente su profundidad a más de 1km.

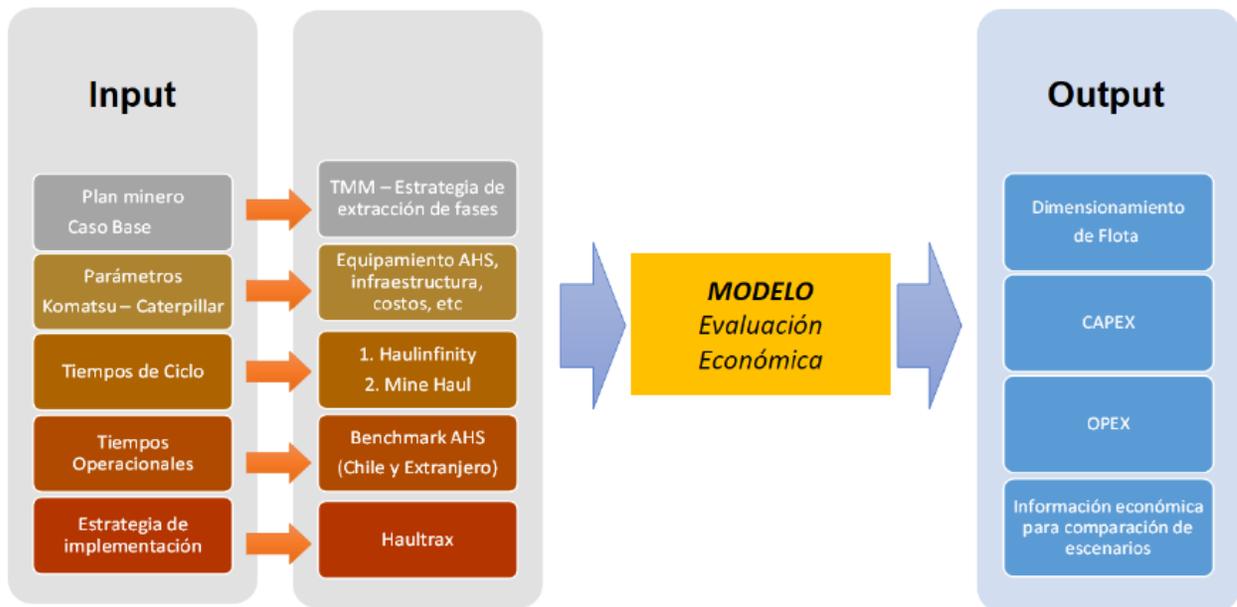
## 2.6.2 Análisis económico

En el reporte, se presentan los análisis del impacto de la tecnología autónoma por componente de manera independiente, es decir, sin tomar en cuenta posibles sinergias que podrían tener estos elementos. Los costos estudiados se presentan a continuación <sup>2</sup>:

**Tabla N° 2-11: Componentes considerados en análisis económicos.**

<b>Costo capital</b>	<b>Costo operativo</b>
Compra y venta de camiones	Operadores de camión y sistema (sueldo, alojamiento, transporte y alimentación)
Infraestructura AHS	Mantenimiento de flota (repuestos y personal de mantenimiento)
	Costos de petróleo
	Costos de neumáticos
	Costos específicos de operación AHS (contratos, licencias, entre otros)

El modelo de evaluación se presenta a continuación:



**Figura N° 2-13: Esquema conceptual de modelo de evaluación de Haultrax para análisis de costos.**

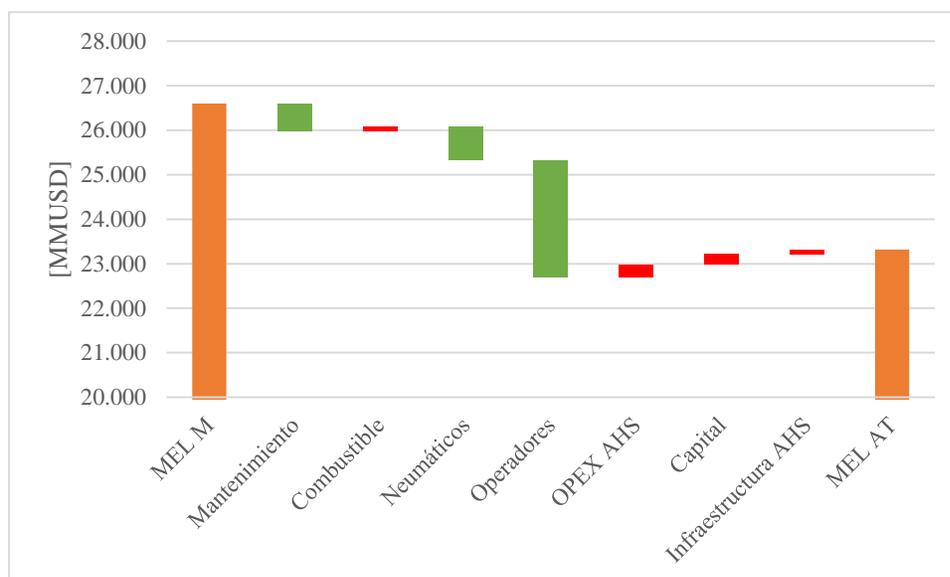
<sup>2</sup> Los parámetros utilizados en el análisis se presentan en la sección de anexos.

### 2.6.2.1 Escondida

El análisis se realiza considerando el horizonte de explotación del rajo principal Escondida (operación hasta el FY 81). Al analizar los impactos de la tecnología autónoma en los costos de la operación de Escondida, se tienen los siguientes valores:

**Tabla N° 2-12: Resultados de análisis económico para rajo Escondida de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

Escenarios	OPEX [MMUSD]					CAPEX [MMUSD]	
	Mantenimiento	Combustible	Neumáticos	Operadores	OPEX AHS	Capital	Infraestructura AHS
MEL M	7,790	11,259	2,345	2,626	-	2,571	-
MEL AT	7,173	11,354	1,591	-	895	2,805	109
<b>Diferencia [\$MMUSD]</b>	617	-94	754	2,626	-895	-234	-109
<b>Diferencia [%]</b>	7.93	-0.84	32.16	100	-100	-9.11	-100



**Gráfico N° 2-1: Resultados gráficos de análisis económico para rajo Escondida de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

Como se puede observar, se puede alcanzar una reducción de 3,280 [MMUSD] en la operación total del rajo Escondida con la implementación de tecnología autónoma. Esto se debe fundamentalmente a tres factores: la disminución del costo de mantenimiento, producto de las características de la operación de la tecnología autónoma y la mayor duración de los componentes; menor gasto en neumáticos, dado por la mayor vida útil de estos alcanzada con la autonomía; y el costo en fuerza laboral, dada por menor dependencia en operadores de equipos.

Por otro lado, el costo capital aumenta debido a un mayor costo de cada unidad de camión autónomo y la infraestructura adicional requerida para la operación, pero este monto no involucra un cambio de decisión con respecto a los ahorros obtenidos.

Se debe mencionar que el estudio trabaja considerando un consumo igual para camiones autónomos y camiones convencionales, lo cual en la realidad no es así. La experiencia práctica indica que, dada la menor variabilidad de la velocidad de equipos autónomos (presentando un andar más homogéneo), logran buenos consumos de combustible y ritmos de producción al minimizar

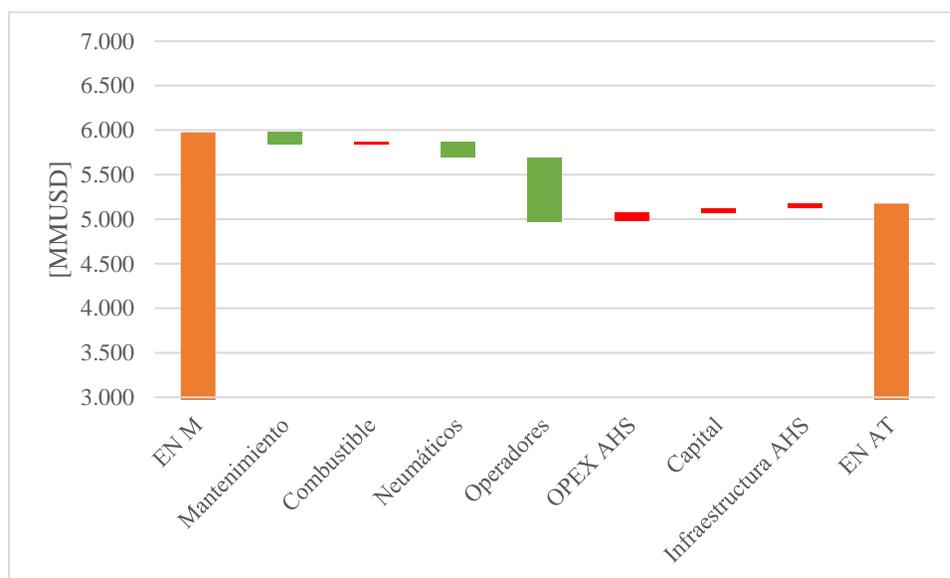
las interacciones con los camiones autónomos. Por lo tanto, la reducción en costos podría ser aún menor.

### 2.6.2.2 Escondida Norte

El análisis se realiza considerando el horizonte de explotación del rajo Escondida Norte (operación hasta el FY 55). Al analizar los impactos de la tecnología autónoma en los costos de la operación de Escondida, se tienen los siguientes valores:

**Tabla N° 2-13: Resultados de análisis económico para rajo Escondida Norte de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

Escenarios	OPEX [MMUSD]				CAPEX [MMUSD]		
	Mantenimiento	Combustible	Neumáticos	Operadores	OPEX AHS	Capital	Infraestructura AHS
<b>MEL M</b>	1,750	2,376	534	719	-	595	-
<b>MEL AT</b>	1,615	2,402	363	-	313	648	51
<b>Diferencia [\$MMUSD]</b>	136	-26	170	719	-313	-54	-51
<b>Diferencia [%]</b>	7.75	-1.09	31.92	100	-100	-9.04	-100



**Gráfico N° 2-2: Resultados gráficos de análisis económico para rajo Escondida Norte de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

Como se puede observar, se puede alcanzar una reducción de 799 [MMUSD] en la operación total del rajo Escondida Norte con la implementación de tecnología autónoma. Nuevamente, el factor más relevante de la disminución de costos corresponde a la menor dependencia en operadores de equipos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una parte de los costos Opex AHS involucran la contratación de nuevo personal especializado en autonomía y crear nuevos roles que no existen en una operación manual.

### 3 METODOLOGÍA

La metodología de desarrollo del proyecto se divide en diversas etapas. En primer lugar, se simuló la situación sin proyecto (caso base) en la cual se intentan reproducir los resultados obtenidos por el *software MineHaul2* para los años estudiados. En segundo lugar, se realiza la simulación con camiones autónomos intentando mantener una flota de cierto número a lo largo de los años simulados.

Se realizaron simulaciones para los FY 2024-2028, cada uno desarrollado en un proyecto distinto de DSim.

#### 3.1 Actualización de topografía y trazado de rutas

Con la información recibida de *MineHaul2*, se procedió a actualizar la topografía a los años a ser simulados para después sobre esta trazar las rutas a ser consideradas por DSim. Para las rutas se siguió los direccionamientos de *MineHaul2* teniendo en cuenta no superar una pendiente de 10% para rampas y la ubicación de infraestructura dada por la topografía.

#### 3.2 Plan de producción

Para cada año a ser simulado, se exportó la información desde *MineHaul2* que corresponde al movimiento anual esperado de la operación, el cual se dividió en 365 [d] dados los días operativos considerados por Minera Escondida para realizar simulaciones diarias. Luego, se asignaron palas a distintos frentes de trabajo intentando satisfacer la capacidad de las mismas.

#### 3.3 Modelamiento usando *software* de simulación

La información colectada se traspasó al *software* de planificación DSim:

- ❖ Se dealinearán las rutas y se clasificarán de acuerdo a los perfiles de velocidad considerados.
- ❖ Se ubicarán las distintas frentes de trabajo en conjunto con las diversas locaciones en las cuales ocurren las actividades consideradas en la operación.
- ❖ Se ingresarán las flotas de palas y camiones a ser utilizados en cada período junto con sus parámetros técnicos asociados.
- ❖ Se ingresarán mantenciones e interrupciones programadas.
- ❖ Se definirán en qué locaciones se ubican los chancadores y sus rendimientos asociados.
- ❖ Se ingresarán el tiempo de trabajo por día y el plan de producción resultante para cada año simulado.

### 3.4 Simulaciones

En primer lugar, para cada caso, a partir de la disponibilidad mecánica comprometida, se define una porción de la flota que se encuentre en mantención programada para el día que se simula. La idea es hacer más representativa la cantidad de equipos con la que se cuenta para la operación. Esto luego, se corrobora con los resultados que entrega el *software* DSIM.

El método de realización de simulaciones se realizó en diversas etapas:

- a) Se comienza trabajando con un valor de TPH bajo, como base para comenzar a adecuar las simulaciones. En esta fase se realizaron 20 réplicas por simulación.
- b) Se comienza a aumentar el TPH para alcanzar la producción objetivo sin exceder un tiempo límite de espera en cada frente, definido en 5 minutos. En esta fase se realizaron 20 réplicas por simulación.
- c) Una vez alcanzado un resultado acorde a la producción estimada, se procedió a aumentar la cantidad de réplicas a 100 para obtener resultados más representativos y estimar un resultado promedio de un año de operación.

### 3.5 Análisis de resultados

A partir de los logs que genera el *software* DSim (*Log\_Cycles*, *Log\_EmptyTravels*, *Log\_Fronts*, *Log\_LoadedTravels*, *Log\_ShovelActivities* y *Log\_TruckActivities*), se corre una Macros, modificada de acuerdo a lo que el usuario quiera obtener como resumen de resultados, la cual genera representaciones visuales (gráficos y tablas) de la información obtenida.

El proyecto considera las siguientes cuatro etapas para esta etapa de análisis:

1. Análisis de caso base (simulaciones de 100 réplicas): se realiza un estudio detallado de los casos base, tomando en cuenta el porcentaje de cumplimiento del plan y factores operacionales de palas y camiones.
2. Análisis de caso con proyecto con igual dotación de camiones (simulaciones de 100 réplicas): se hace un análisis de la operación con la misma cantidad de camiones autónomos que manuales considerados en el caso base.
3. Análisis de caso con proyecto con menor dotación de camiones autónomos (simulaciones de 100 réplicas): se busca alcanzar una mayor utilización de camiones la tecnología autónoma que no requiere de colaciones o cambios de turno.
4. Análisis exploratorio de caso con proyecto con dotación de camiones que iguala la producción del caso base (20 réplicas): se estresa al sistema, variando la cantidad de camiones con el fin de obtener el mismo resultado de producción del caso base del año que se analice.

## 4 CASO DE ESTUDIO

Se realizó la solicitud de información de parámetros utilizados por la faena para equipos manuales a Minera Escondida para poder comenzar a realizar las simulaciones.

### 4.1 Casos a simular

Los casos de autonomía de equipos de transporte analizados son los siguientes:

- a) FY 2024 → Aislación y autonomía de Escondida Norte
- b) FY 2025 → Aislación y autonomía de Escondida Norte
- c) FY 2026 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fase S4 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida
- d) FY 2027 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida
- e) FY 2028 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida  
→ Autonomía de Escondida Norte y Escondida

### 4.2 Plan de producción

El plan de producción, junto con la ubicación de frentes de carguío y descarga, y un estimado de la flota de camiones requeridos por año a ser simulado, se recibió como un archivo del *software* MineHaul2 el cual contiene información del informe *Life of Asset 19*, el cual se titula:

*LoA19\_LCE35\_New\_Angle\_OP5 ESTRS.mh2*

En el proyecto, se define que la prioridad de saturación de camiones por origen-destino la tendrá en primer lugar el mineral que se dirige a chancadores, luego mineral que se transporta a pilas de lixiviación y stocks, y finalmente material que tiene como destino botaderos<sup>3</sup>.

### 4.3 Rendimiento de chancadores

Se trabaja con las capacidades nominales de los equipos de chancado primario que se presentan a continuación:

**Tabla N° 4-1: Capacidades nominales de equipos de chancado primario.<sup>4</sup>**

<sup>3</sup> En la sección de anexos se pueden encontrar las topografías, rutas y planes de producción diarios para cada año simulado.

<sup>4</sup> Se debe tener en cuenta que, para una correcta recuperación de cobre en las pilas de lixiviación dinámica de mineral oxidado, se puede como tope tener un 17% de mineral con arcillas (debido a la baja permeabilidad que presenta este tipo de roca). Esto corresponde a una restricción para el mineral que es enviado al chancador 4.

	<b>Capacidad Nominal [tph]</b>
<b>Ch1</b>	4,500
<b>Ch2</b>	7,420
<b>Ch3</b>	9,328
<b>Ch4</b>	5,000
<b>Ch5</b>	9,328

#### 4.4 Equipos de carguío

Actualmente se cuenta con una flota de 16 palas cable de 73 [yd<sup>3</sup>] que trabajan desarrollando fases y en operaciones de remanejo. La capacidad de cada una de estas palas está estimada en 35 [mtpa] lo que equivale a 96,000 [tpd] aproximadamente. Las mantenciones se estiman en función de tiempos de falla de equipos de 50 [h] con un tiempo medio de reparación 6 [h]. Los modelos de los equipos se presentan a continuación:

**Tabla N° 4-2: Modelos de palas de cable a utilizar para las simulaciones.**

<b>Palas de Cable</b>	
<b>P&amp;H 4100 XPB</b>	5
<b>P&amp;H 4100 XPC</b>	3
<b>BUCYRUS 495HR</b>	8

#### 4.5 Equipos de transporte manuales

Para los años simulados se cuenta con la cantidad de camiones considerados por Minera Escondida, obtenidos del reporte generado por el software *FleetAnalyzer*, el cual se titula:

*Reporte\_fleet\_LCEFY35\_New\_Angle.csv*

Por otro lado, se cuenta con la siguiente información histórica:

- ❖ Se planea hacer uso de equipos de gran capacidad como los son los modelos Komatsu 960E y CAT 797.
- ❖ La proporción entre equipos Komatsu y CAT es de 28% y 72% respectivamente.
- ❖ Las mantenciones no programadas se estiman en función de tiempos entre fallas de equipos de 50 [h] con un tiempo medio de reparación 4 [h].
- ❖ Las mantenciones programadas se definen de manera de cumplir con la disponibilidad mecánica comprometida para tales años, la cual se presenta en la siguiente tabla:

**Tabla N° 4-3: Utilización y disponibilidad mecánica comprometida para años a simular.**

<b>Objetivo</b>	
<b>UT [%]</b>	<b>DM [%]</b>
83	86

- ❖ Los factores de carga de ambos modelos se presentan a continuación:

**Tabla N° 4-4: Factores de carga de equipos Komatsu 960E y CAT 797.**

<b>Factores de carga 5YP-LoA19</b>		
<b>797 B/F</b>	t secas	343
<b>960E</b>	t secas	321

- ❖ Los perfiles de velocidad de ambos equipos se estiman a partir de bases históricas utilizando el P90 de estos valores dado que DSIM considera congestiones en el camino y pérdidas de velocidad.

**Tabla N° 4-5: Perfiles de velocidad estimada a partir del P90 de información histórica para equipos Komatsu 960E y CAT 797.**

	<b>Velocidad [km/h]</b>	
	<b>CAT 797</b>	<b>KOM 960</b>
<b>P90 Base Histórica Julio-Agosto 2017</b>		
<b>Descendiendo descargado</b>	42.92	42.00
<b>Descendiendo cargado</b>	38.55	36.69
<b>Plano descargado pila de lixiviación</b>	52.90	51.61
<b>Plano descargado en banco</b>	30.25	32.18
<b>Plano descargado In Pit</b>	34.20	34.20
<b>Plano descargado Out Pit</b>	37.50	37.82
<b>Plano cargado pila de lixiviación</b>	41.21	41.12
<b>Plano cargado In Bench</b>	17.59	19.00
<b>Plano cargado In Pit</b>	25.63	24.60
<b>Plano cargado Out Pit</b>	24.18	25.14
<b>Ascendiendo descargado</b>	40.00	39.29
<b>Ascendiendo cargado</b>	17.73	18.90

#### 4.5.1 Tiempos fijos de actividades y *matching* entre palas y camiones manuales

La información entregada por Minera Escondida establece el siguiente horario de actividades durante un día de operación:

**Tabla N° 4-6: Interrupciones programadas para un día de operación normal manual.**

<b>Descripción</b>	<b>Actividades</b>			
	<b>Tiempo de inicio [hora]</b>	<b>Duración (distribución asociada) [min]</b>	<b>Lugar de ocurrencia</b>	<b>Equipos afectados</b>
<b>Fin Turno Noche Inicio Turno Día Palas</b>	08:00:00	triangular(5,15,20)		Palas Cable
<b>Fin Turno Noche Inicio Turno Día Camiones</b>	08:00:00	triangular(10,20,30)	Estacionamientos	Camiones
<b>Colación Día 1</b>	13:00:00	triangular(50,60,70)	Comedores	Camiones
<b>Fin Turno Día Inicio Turno Noche Palas</b>	20:00:00	triangular(5,15,20)		Palas Cable
<b>Fin Turno Día Inicio Turno Noche Camiones</b>	20:00:00	triangular(10,20,30)	Estacionamientos	Camiones
<b>Colación Noche 1</b>	02:00:00	triangular(25,30,35)	En ruta	Camiones
<b>Colación Noche 2</b>	05:00:00	triangular(25,30,35)	En ruta	Camiones
<b>Petroleo</b>	random()	Triangular(8,10,15)	Petroleras	95% Camiones

Se consideran relevos en las colaciones con conductores de otros equipos auxiliares, es por esto que se considera que la mitad de la flota de camiones sigue en operación cuando ocurren estos eventos. No se considera tiempo de tronaduras porque esta ocurre una vez por turno de 7 días, tiene

una duración de 1:30 a 2:00 horas y normalmente se hace coincidir con las colaciones de los operadores.

Por otro lado, los tiempos fijos de operación se estiman a partir de los valores comprometidos para el LoA 19 tanto en carga (*matching* pala-camión) como descarga:

**Tabla N° 4-7: Tiempos fijos de carga y descarga equipos de transporte manuales.**

Tiempos fijos de operación		
Tiempo carga	[min]	1.70
Tiempo aculataamiento carga	[min]	0.90
Tiempo descarga botadero, stock, pilas de lixiviación	[min]	0.9
Tiempo aculataamiento botadero, stock, pilas de lixiviación	[min]	1.1
Tiempo descarga Ch1	[min]	0.9
Tiempo aculataamiento Ch1	[min]	1.1
Tiempo descarga Ch2&3	[min]	0.9
Tiempo aculataamiento Ch2&3	[min]	1.1
Tiempo descarga Ch4	[min]	0.9
Tiempo aculataamiento Ch4	[min]	1.1
Tiempo descarga Ch5	[min]	0.9
Tiempo aculataamiento Ch5	[min]	1.1

#### 4.6 Equipos de transporte autónomos

Para camiones autónomos se considera el uso de tecnología Komatsu con las siguientes especificaciones:

- ❖ Se planea utilizar camiones de gran capacidad como lo son los camiones Komatsu 980E. Estos a los años en que se simula y analiza estará en el mercado.
- ❖ Según los informes de las compañías que utilizan esta tecnología, se tiene una disponibilidad mecánica un 2% mayor que la de los camiones normales. Para este caso, dada la información de Minera Escondida, se considera una disponibilidad mecánica objetivo de 88%.
- ❖ Las mantenciones no programadas se estiman en función de tiempos del aumento en la disponibilidad mecánica y considerando que, en general, se tiene que los tiempos de reparación son mayores (dada la mayor complejidad de los sistemas a bordo) pero tiempos entre fallas mayores. Se considera un tiempo entre fallas de equipos de 80 [h] con un tiempo medio de reparación 4.6 [h].
- ❖ El factor de carga que se considera es el valor dado por el vendor para este tipo de equipos, estimado en 359 [t],
- ❖ La burbuja de seguridad considerada es la que se presenta en la revisión bibliográfica para los equipos Komatsu, es decir, 50 [m].
- ❖ Se obtuvieron tres perfiles de velocidad para camiones autónomos Komatsu 930E. Para el estudio se considera el perfil de velocidades más actualizado y se hace una corrección para camiones autónomos Komatsu 980E, considerando las mayores capacidades estipuladas por los fabricantes para este equipo.

**Tabla N° 4-8: Perfiles de velocidad estimada para equipos Komatsu 980E.**

		Velocidad [km/h]	
		KOM 930E (autónomo)	KOM 980E (autónomo)
Descendiendo descargado In Pit	[km/h]	30.00	32.00
Descendiendo descargado Out Pit	[km/h]	30.00	32.00
Descendiendo cargado In Pit	[km/h]	24.00	28.00
Descendiendo cargado Out Pit	[km/h]	24.00	28.00
Plano descargado In Pit	[km/h]	45.00	47.00
Plano descargado Out Pit	[km/h]	45.00	47.00
Plano cargado In Pit	[km/h]	39.00	41.00
Plano cargado Out Pit	[km/h]	39.00	41.00
Ascendiendo descargado In Pit	[km/h]	22.00	24.00
Ascendiendo descargado Out Pit	[km/h]	22.00	24.00
Ascendiendo cargado In Pit	[km/h]	12.00	15.60
Ascendiendo cargado Out Pit	[km/h]	12.00	15.60
Estacionamientos	[km/h]	10.00	10.00
Para switchbacks	[km/h]	10.00	10.00

#### 4.6.1 Tiempos fijos de actividades y *matching* entre palas y camiones autónomos

Como se mencionó anteriormente, los equipos autónomos no requieren de un operador abordo, por lo que no realizan detenciones de cambios de turno o colaciones. Lo único que se considera es el petroleo de los equipos.

**Tabla N° 4-9: Interrupciones programadas para un día de operación de equipos autónomos.**

Actividades				
Descripción	Tiempo de inicio [hora]	Duración (distribución asociada) [min]	Lugar de ocurrencia	Equipos afectados
Fin Turno Noche Inicio Turno Día Palas	08:00:00	triangular(5,15,20)		Palas Cable
Fin Turno Día Inicio Turno Noche Palas	20:00:00	triangular(5,15,20)		Palas Cable
Petroleo	random()	Triangular(8,10,15)	Petroleras	95% Camiones

Los camiones autónomos requieren de un mayor tiempo en operaciones de carga debido a que deben esperar una señal desde los equipos de carguío para aculatare. Los tiempos fijos de trabajo se obtienen de operaciones que actualmente utilizan estos equipos.

**Tabla N° 4-10: Tiempos fijos de carga y descarga equipos de transporte autónomos.**

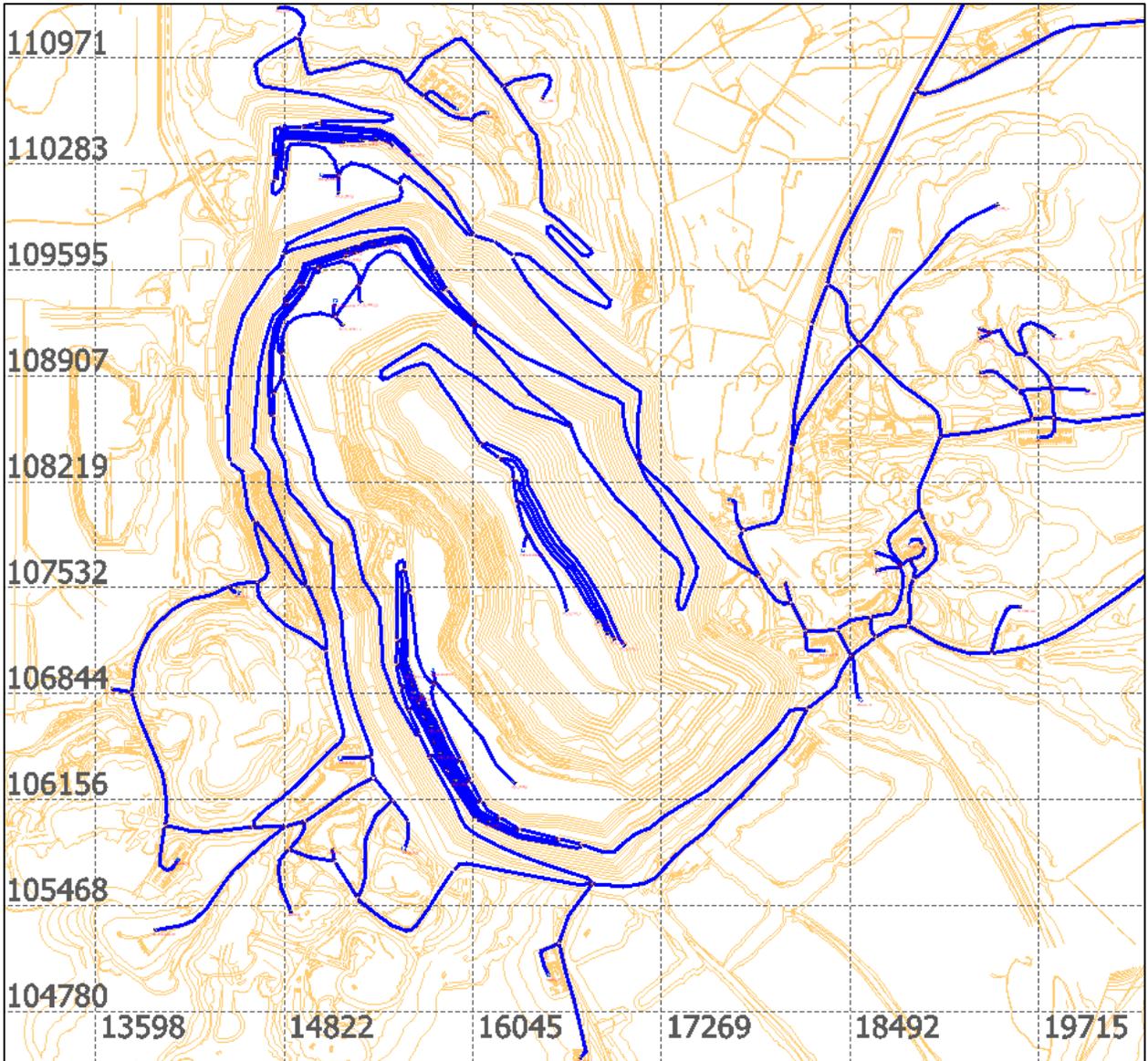
Tiempos fijos de operación		
Tiempo carga	[min]	1.70
Tiempo aculatamiento carga	[min]	1.50
Tiempo descarga botadero, stock, pilas de lixiviación	[min]	1.20
Tiempo aculatamiento botadero, stock, pilas de lixiviación	[min]	1.20
Tiempo descarga chancador	[min]	0.90
Tiempo aculatamiento chancador	[min]	1.20

#### 4.7 *Layout* de la faena

El *layout* de la mina se confeccionó teniendo en cuenta las rutas y la ubicación de infraestructura actual en la faena y el desarrollo de las fases de cada año simulado. De esta manera se tienen las siguientes locaciones:

- ❖ Un *truck shop* principal, cercano a las fases P1 de Escondida, en el cual se llevan a cabo las mantenciones programadas y no programadas de los equipos de transporte.
- ❖ Siete comedores, tres cercanos al rajo Escondida, uno cercano a los stocks de Escondida, uno cercano a los stocks de Escondida Norte y dos cercanos al rajo Escondida Norte.
- ❖ Seis estaciones de petróleo, tres cercanas al rajo Escondida, una cercana a la entrada a las pilas de lixiviación estáticas de sulfuros de cobre de baja ley y dos cercanas al rajo Escondida Norte.
- ❖ Cinco estacionamientos, tres cercanos al rajo Escondida y dos cercanos al rajo Escondida Norte.
- ❖ Estacionamientos in-pit ubicados cercanos a la posición de la pala de carguío en cada una de las fases explotadas.
- ❖ Frentes de extracción y destinos de material dependiendo del año que se esté simulando.

Como ejemplo, se muestra el *layout* del año 2026, el cual cuenta con todas las locaciones anteriormente mencionadas.



**Figura N° 4-1: Layout rajo Escondida según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.**

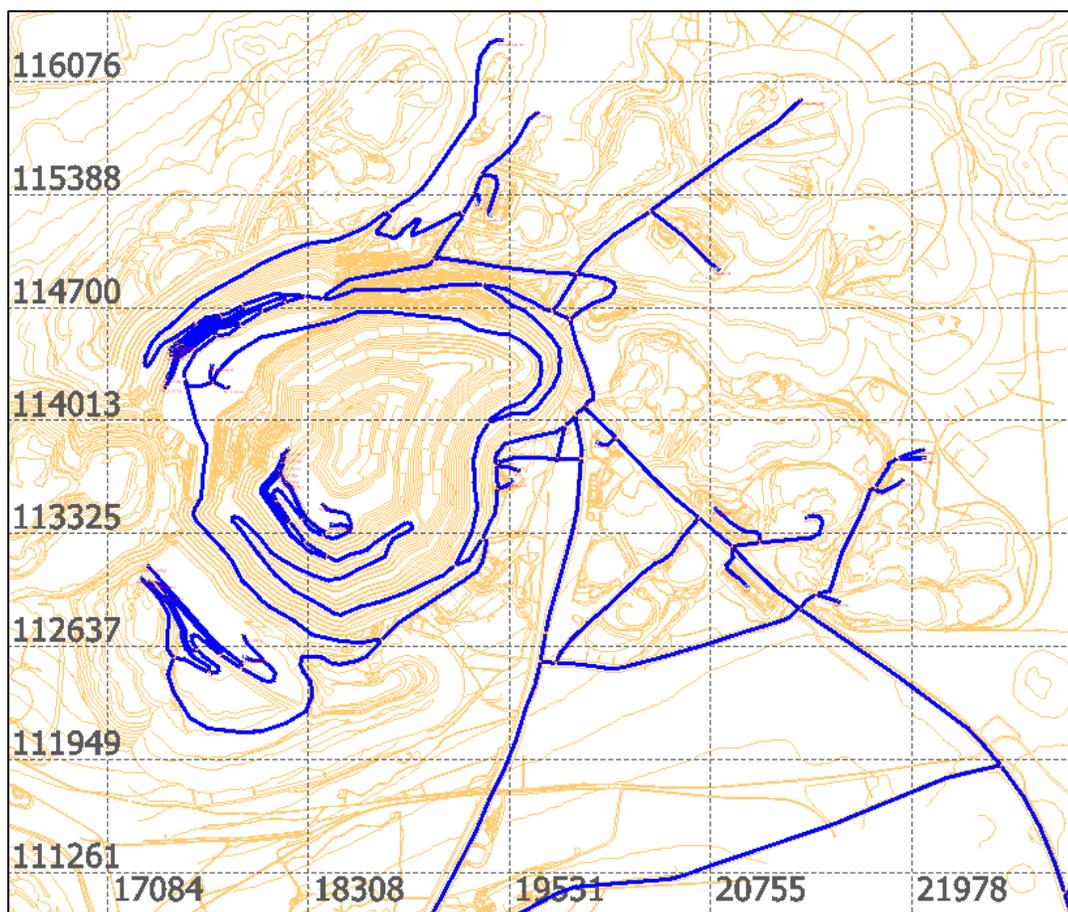


Figura N° 4-2: Layout rajo Escondida Norte según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.

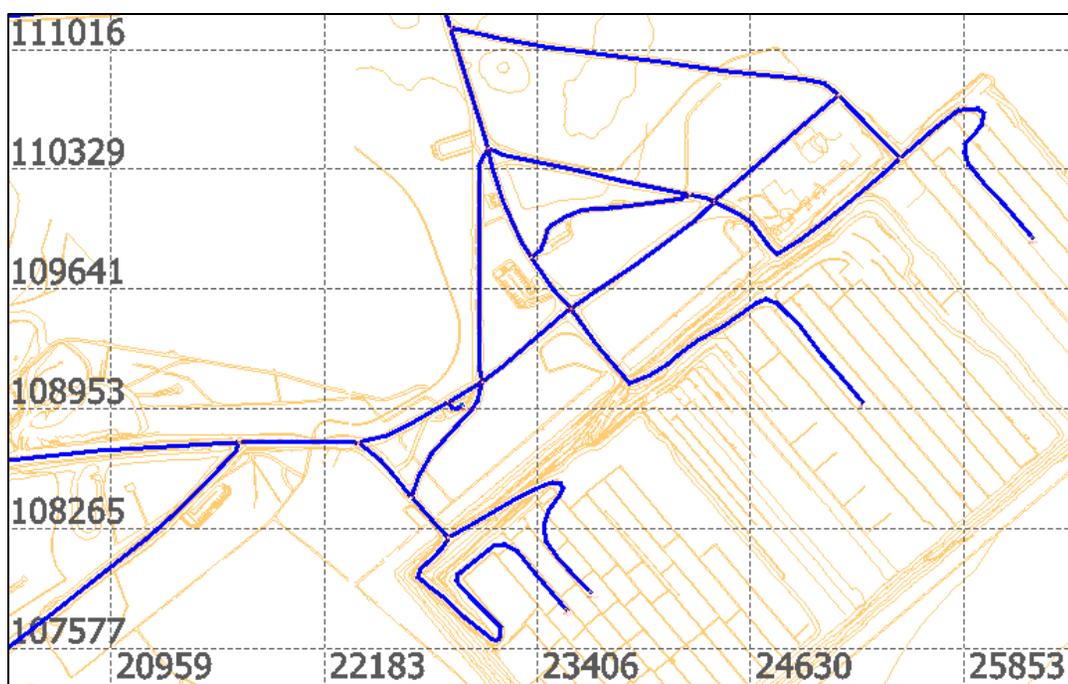


Figura N° 4-3: Layout pilas de lixiviación estáticas de sulfuros de cobre de baja ley según FY 2026. Fuente: Minera Escondida.

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Esta sección se enfocará en presentar los resultados de las simulaciones y los supuestos tomados en cuenta para cada caso analizado. Como se mencionó anteriormente, en primer lugar, se realizaron simulaciones de los casos base con camiones manuales para tener un punto de comparación al integrar la tecnología autónoma.

### 5.1 Casos base

Haciendo uso de la información provista por Minera Escondida, se realizaron las simulaciones de los años estudiados.

#### 5.1.1 FY 2024

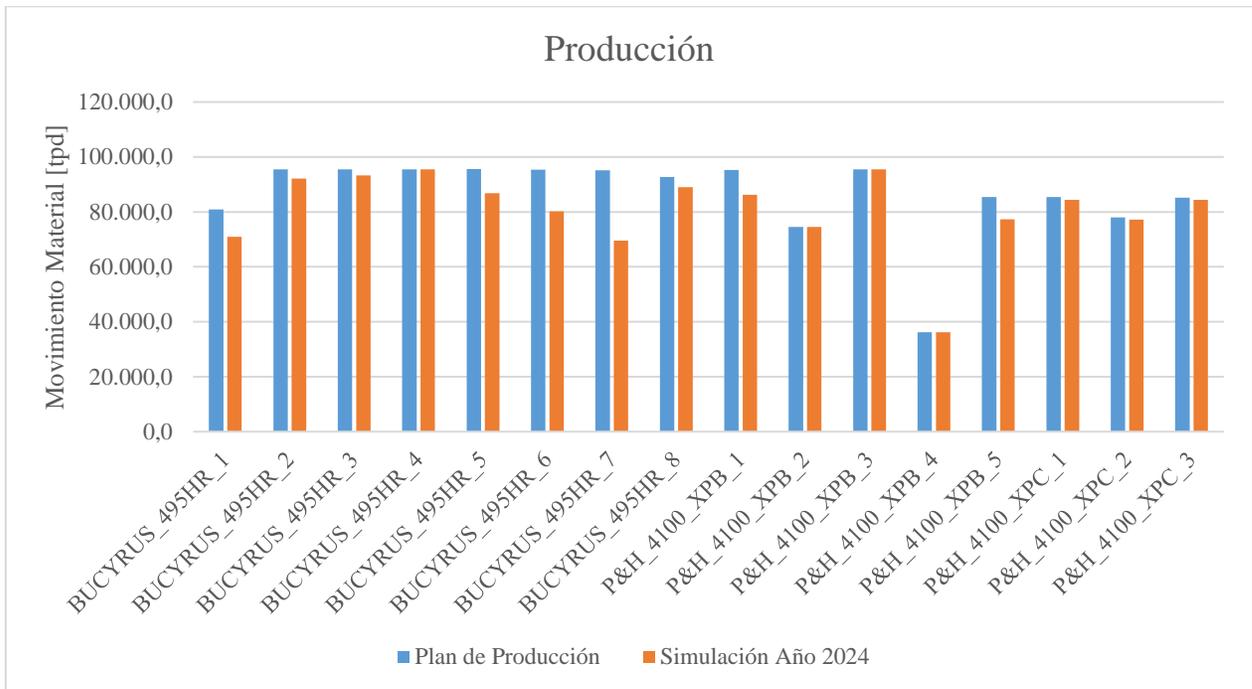
El FY 2024 considera el uso de 165 camiones, de los cuales, por proporción, se consideran 119 CAT 797 y 46 Komatsu 960E.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-1: Producción simulación caso base, 2024.**

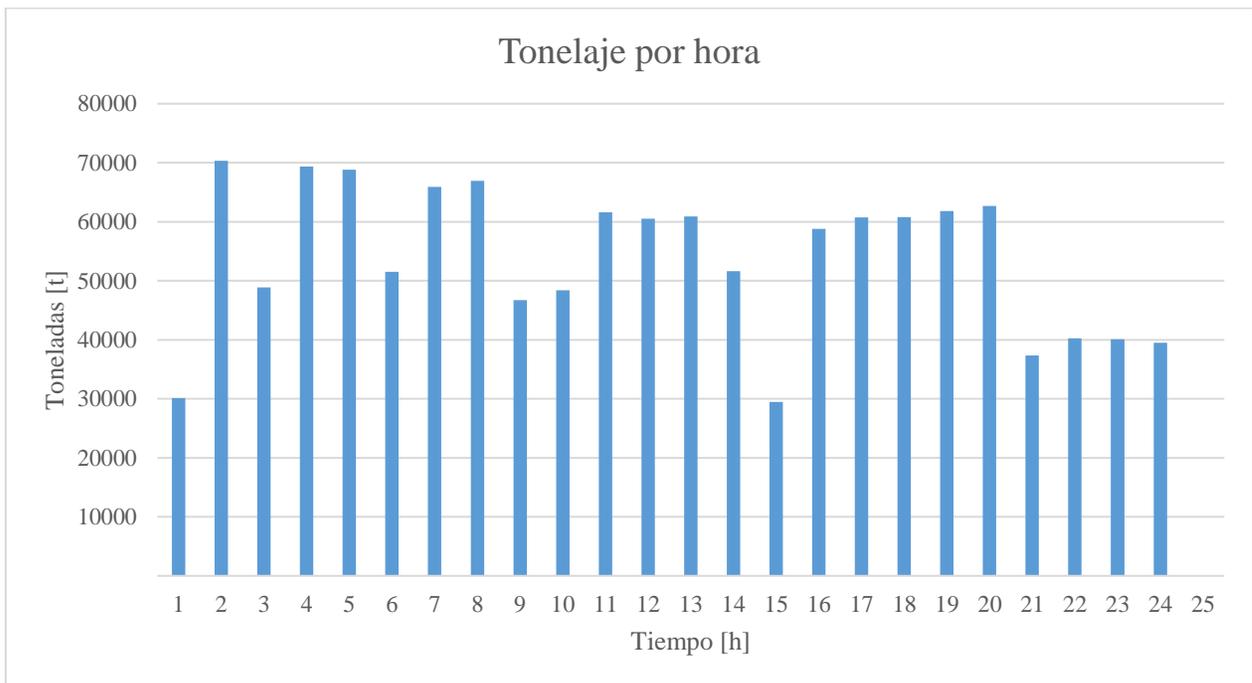
	<b>Escondida</b>	<b>Escondida Norte</b>	<b>Total</b>
<b>Producción planificada [t]</b>	1,047,492	333,937	1,381,429
<b>Producción simulaciones [t]</b>	969,795	323,174	1,292,969
<b>Cumplimiento [%]</b>	92.6	96.8	93.6

El sistema de *dispatch* de DSim, prioriza circuitos con tiempo de ciclo menores. Si observamos la tabla anterior, Escondida Norte alcanza un mayor cumplimiento que Escondida, lo cual se debe a que la distancia entre frentes y destinos son menores en comparación con los de Escondida.



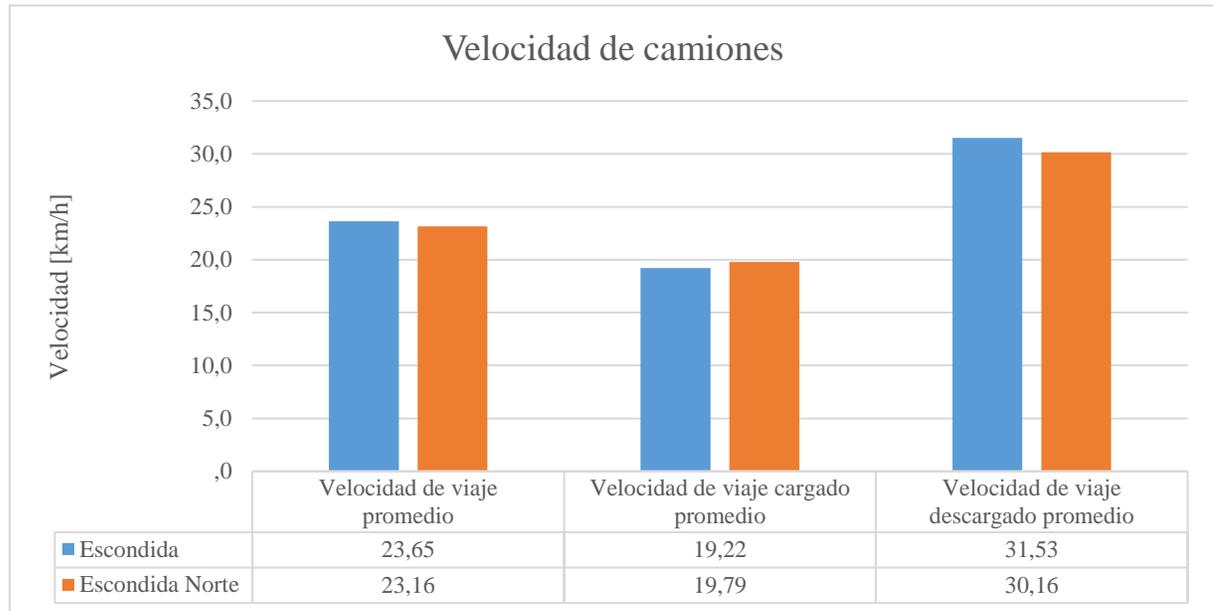
**Gráfico N° 5-1: Producción FY 2024 vs planificada.**

Se puede observar del gráfico anterior que existen palas que alcanzan el nivel de producción proyectado para el año 2024, y otras que se encuentran por debajo de la meta (BUCYRUS\_985HR\_1, BUCYRUS\_985HR\_6 y BUCYRUS\_985HR\_7 asociadas a frentes de Escondida). Las que no alcanzan la meta son debido a restricciones propias del sistema (capacidad de tratamiento máximo de chancadores y congestión del sistema, por ejemplo) o a que son asociadas a orígenes con destinos más lejanos. En total, se tiene un cumplimiento de un 93.6% del tonelaje planificado.



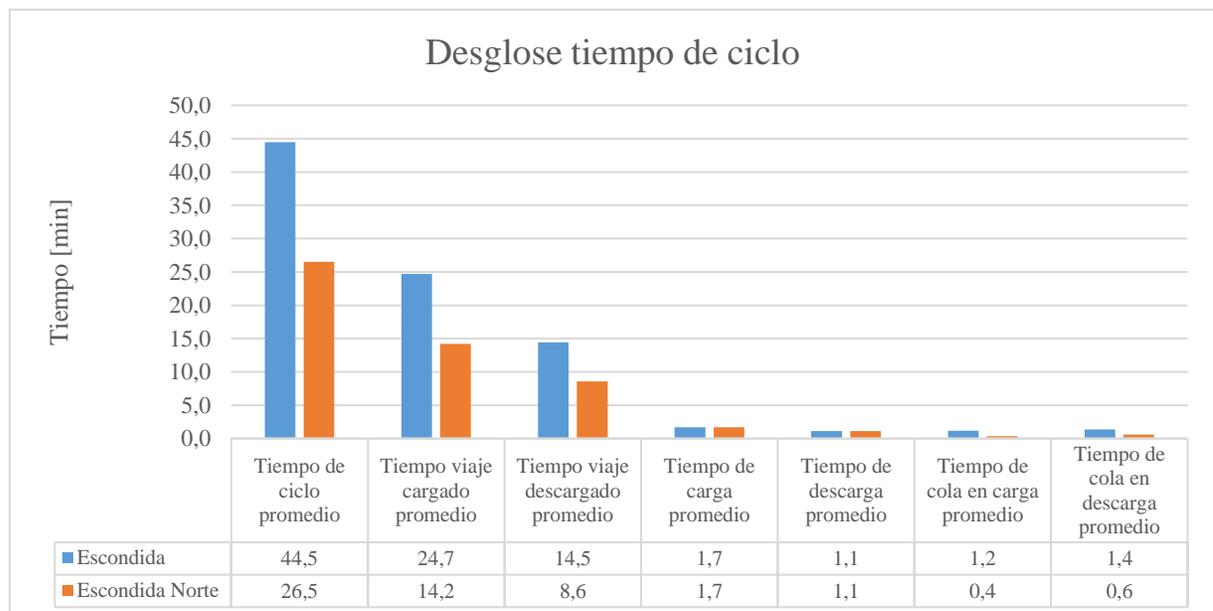
**Gráfico N° 5-2: Tonelaje por hora de simulación, FY 2024.**

Se puede notar que en las primeras horas de operación se alcanza una mayor cantidad de toneladas transportadas por los camiones que en horas hacia el término del día. Esto se debe a que, en primer lugar, en el proyecto se definen prioridades de camiones para chancadores, los cuales en general tienen ciclos más cortos y, por otro lado, el sistema de *dispatch* del *software* DSim privilegia los destinos que tienen tiempos de ciclo menores. Se tiene un *peak* de 70,305 [t/h] de producción del sistema.



**Gráfico N° 5-3: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2024.**

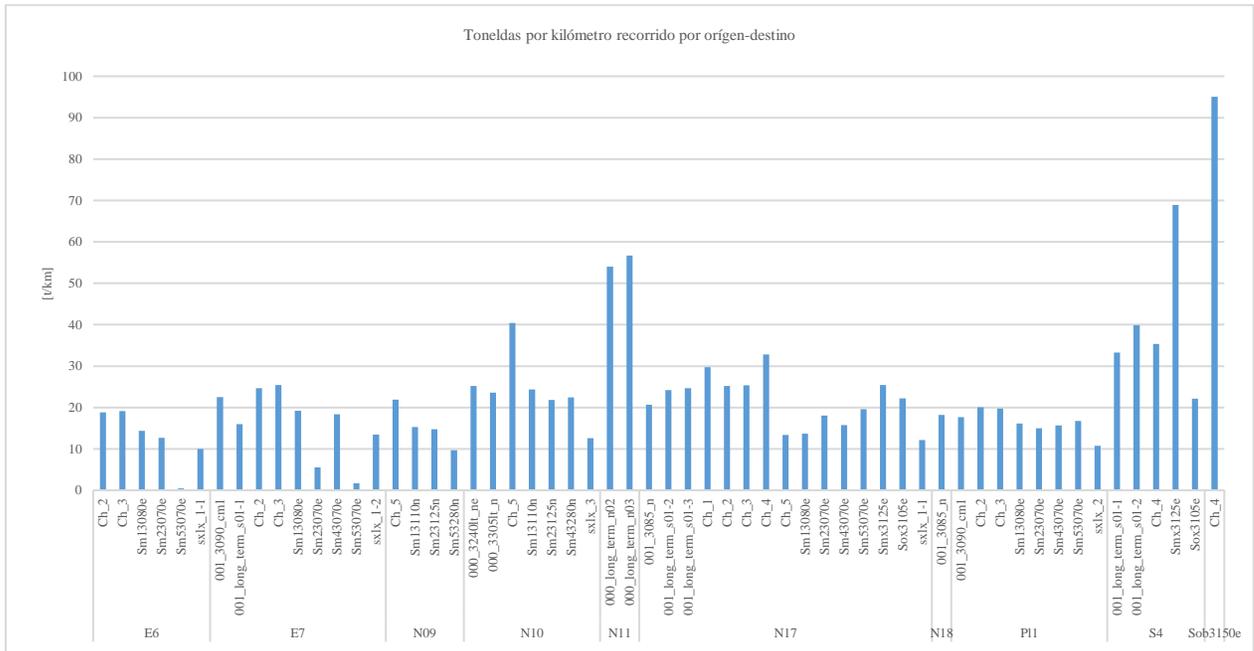
De acuerdo a los perfiles de velocidad ingresados al proyecto y los circuitos del FY 2024, se obtiene una velocidad promedio general del sistema de 23.53 [km/h].



**Gráfico N° 5-4: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2024.<sup>5</sup>**

<sup>5</sup> Para mayor información de los tiempos de ciclo por origen y destino, ir a anexos a la sección Tiempos de ciclo.

En general se tiene que los circuitos de Escondida Norte presentan tiempos de ciclo menor frente a Escondida (26.5 [min] vs 44.5 [min]), debido a la cercanía de orígenes y destinos de material. Como se mencionó anteriormente, con el parámetro TPH de DSim se manejaron las colas de manera que, en cada uno de los destinos, no se tuvieran tiempos en estas mayores a 5 [min]. En promedio, se tienen tiempos de espera en cola de 0.93 [min] en carga y 1.12 [min] en descarga de material. En descarga se tiene que en Escondida se tiene una mayor cantidad de colas por una saturación mayor de los chancadores 1, 2 y 3 frente al chancador 5 de Escondida Norte.



**Gráfico N° 5-5: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2024.**

A partir de la información obtenida, se tiene 22.97 [t/ km recorrido] que cumplen los camiones en promedio en la operación.

**Tabla N° 5-2: Tiempo de actividades de camiones, FY 2024.**

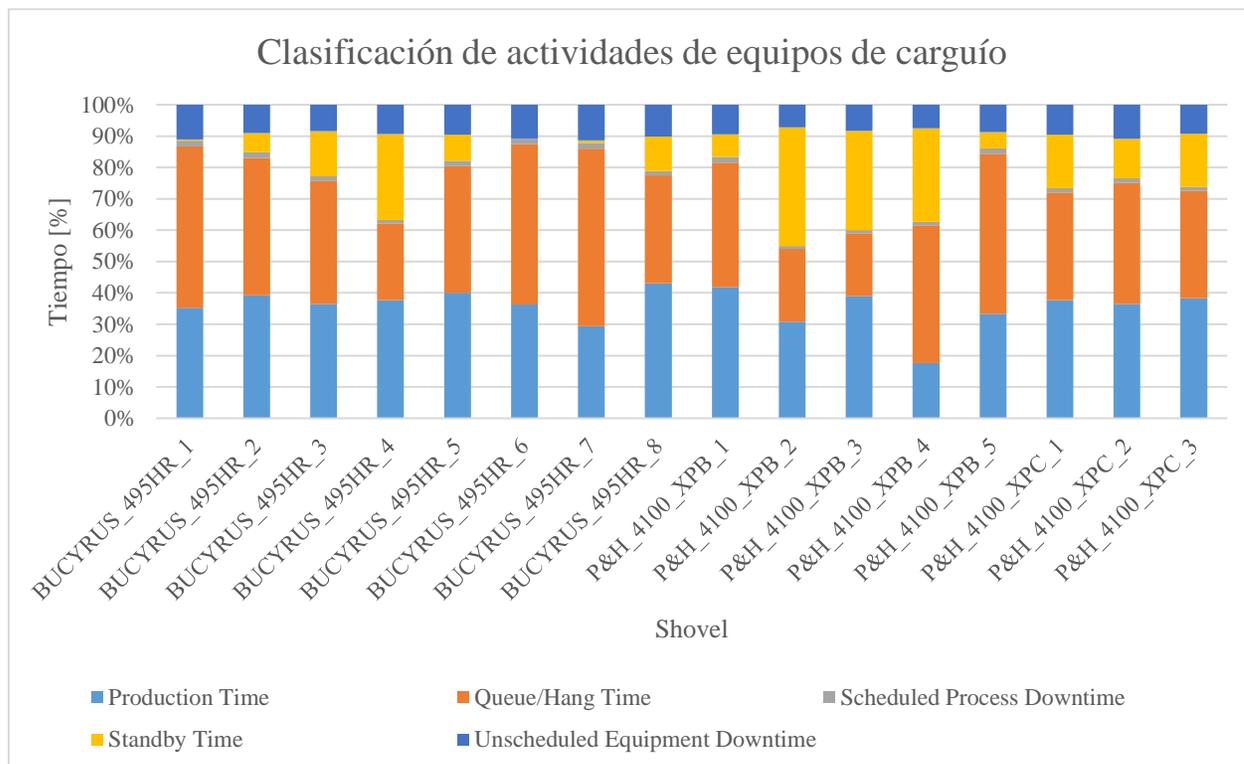
Actividad	Tiempo	
	[h]	[%]
<b>Inicio turno día</b>	0.3	1.36%
<b>Inicio turno noche</b>	0.3	1.41%
<b>Colación día</b>	0.5	2.11%
<b>Colación noche 1</b>	0.2	1.04%
<b>Colación noche 2</b>	0.2	0.89%
<b>Mantenimiento no programada</b>	1.7	6.89%
<b>Mantenimiento programada</b>	1.6	6.54%
<b>Petroleo</b>	0.2	0.74%
<b>Tiempo en colas</b>	0.8	3.41%
<b>Tiempo en reserva</b>	1.2	4.86%
<b>Horas operativas efectivas (sin tiempos de cola)</b>	17.0	70.74%
<b>Total</b>	24.0	100.00%

Los camiones, de acuerdo con los parámetros ingresados, alcanzan un 13.43% de tiempo en mantenimiento (3.3 [h] del día) y cumplen, en promedio 3.41% del tiempo de simulación en colas.

**Tabla N° 5-3: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2024.**

	<b>Comprometido LoA19</b>	<b>Simulación Año 2024</b>
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.0	86.5
<b>Utilización [%]</b>	83.0	82.9

A partir de la información presentada, se tiene una disponibilidad mecánica y utilización acorde a lo comprometido (dentro del margen de error aceptado).



**Gráfico N° 5-6: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2024.**

A partir del gráfico anterior, se puede ver que las palas BUCYRUS 495 1, BUCYRUS 495 6 y BUCYRUS 495 7, a pesar de tener muy poco tiempo en reserva, no alcanzan la producción deseada. Esto se debe a que estas palas son asociadas a camiones con destinos más lejanos.

### 5.1.2 FY 2025

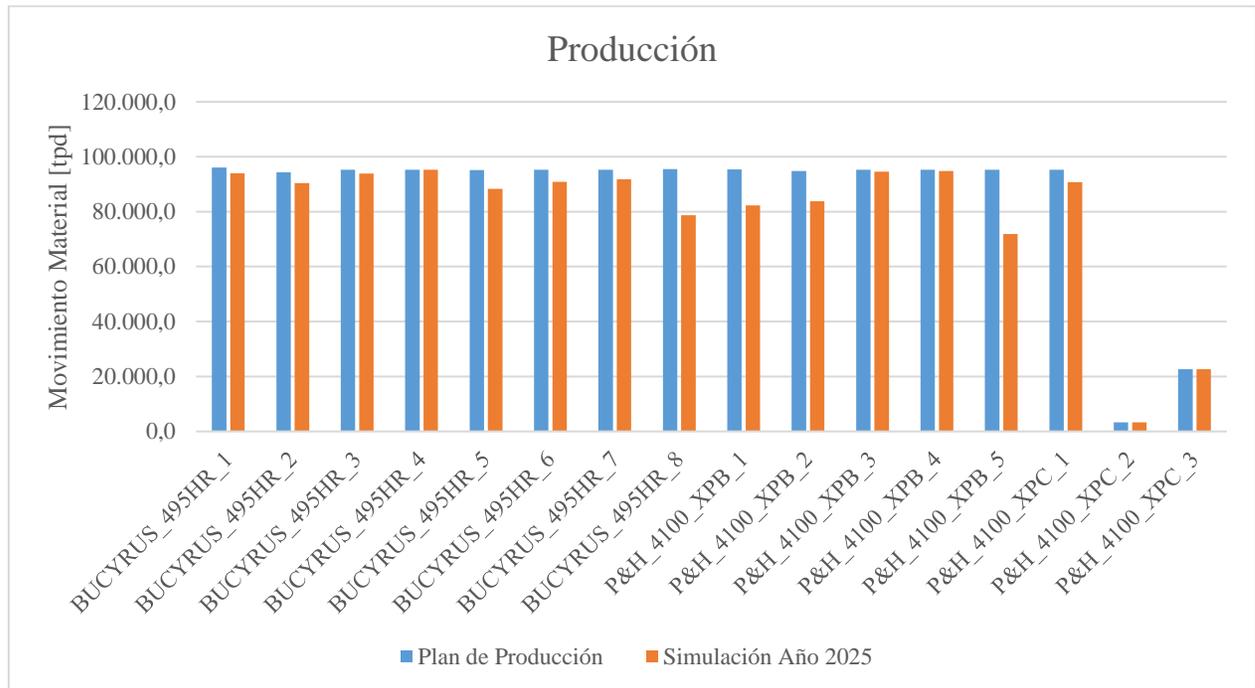
El FY 2025 considera el uso de 139 camiones, de los cuales, por proporción, se consideran 100 CAT 797 y 39 Komatsu 960E.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-4: Producción simulación caso base, 2025.**

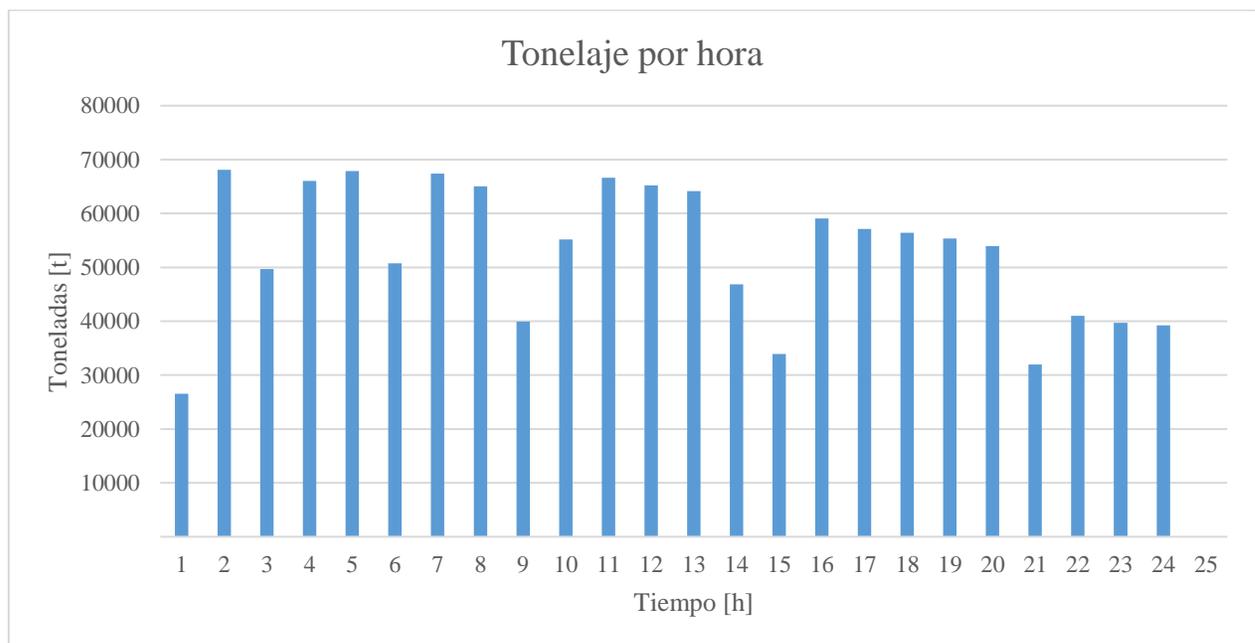
	<b>Escondida</b>	<b>Escondida Norte</b>	<b>Total</b>
<b>Producción planificada [t]</b>	1,069,798	288,845	1,358,642
<b>Producción simulaciones [t]</b>	983,923	283,234	1,267,157
<b>Cumplimiento [%]</b>	92.0	98.1	93.3

Nuevamente, Escondida Norte alcanza un mayor cumplimiento que Escondida, debido a la menor distancia entre frentes y destinos en comparación con los de Escondida.



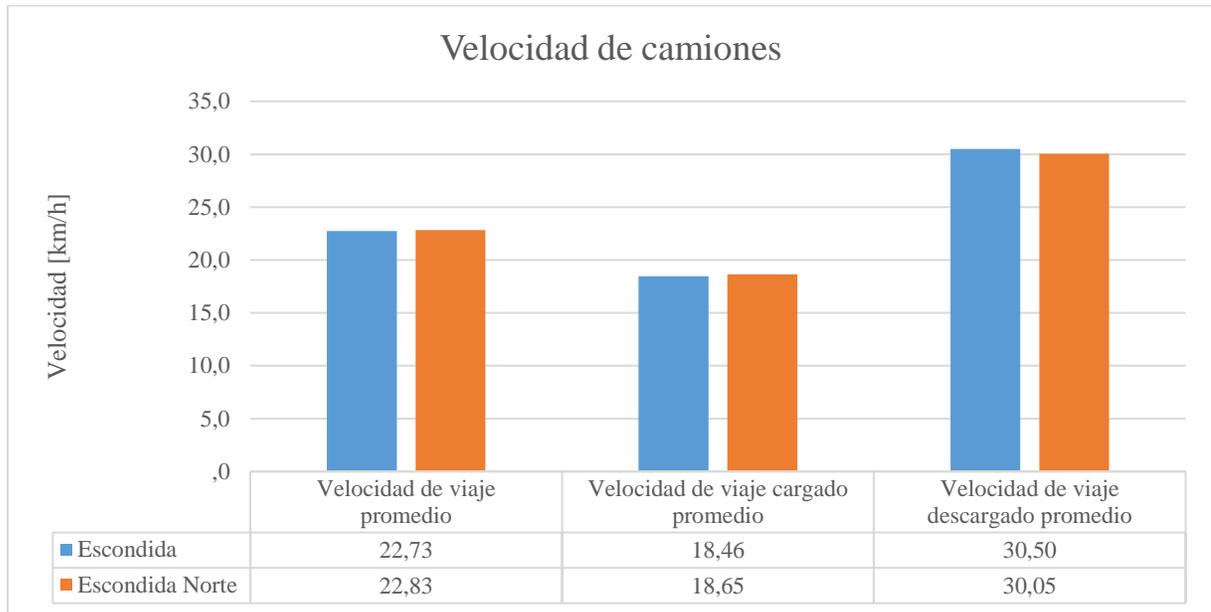
**Gráfico N° 5-7: Producción FY 2025 vs planificada.**

Como se puede observar del gráfico, las palas asociadas a distancias de ciclo mayores (P&H 4100 XPB 1, P&H 4100 XPB 2 y P&H 4100 XPB 5 asociadas a frentes de Escondida) tienen cumplimiento menores que el resto de los equipos de carguío. En total, se tiene un cumplimiento de un 93.3% del tonelaje planificado.



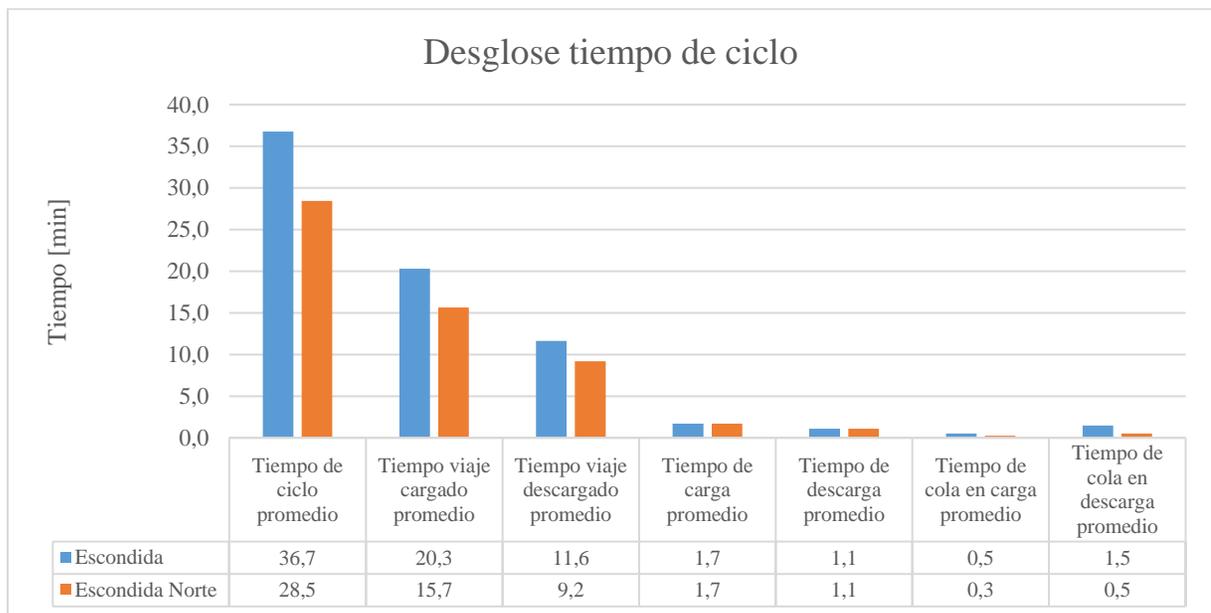
**Gráfico N° 5-8: Tonelaje por hora de simulación, FY 2025.**

Se alcanza una productividad mayor al comienzo y luego una disminución paulatina a lo largo de la simulación, debido a la prioridad mayor de los destinos que tienen tiempos de ciclo menores. Se observa un *peak* de 68,113 [t/h] de producción del sistema.



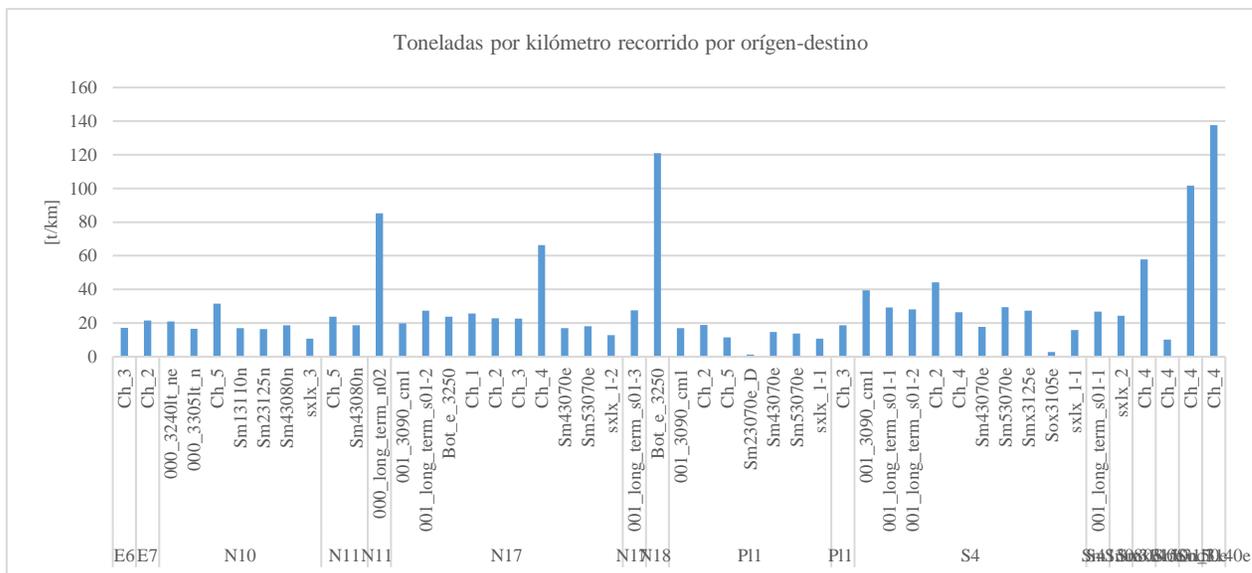
**Gráfico N° 5-9: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2025.**

De acuerdo a los circuitos por los cuales transitan los camiones para este FY y los perfiles de velocidad ingresados al proyecto, se tiene una velocidad promedio del sistema de 23.20 [km/h].



**Gráfico N° 5-10: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2025.**

Escondida sigue presentando tiempos de ciclo mayores que Escondida Norte, 36.7 [min] vs 28.5 [min]. En promedio, se tienen tiempos de espera en cola de 0.72 [min] en carga y 1.16 [min] en descarga de material.



**Gráfico N° 5-11: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2025.**

A partir de la información obtenida, se tiene 28.01 [t/ km recorrido] que cumplen los camiones en promedio en la operación.

**Tabla N° 5-5: Tiempo de actividades de camiones, FY 2025.**

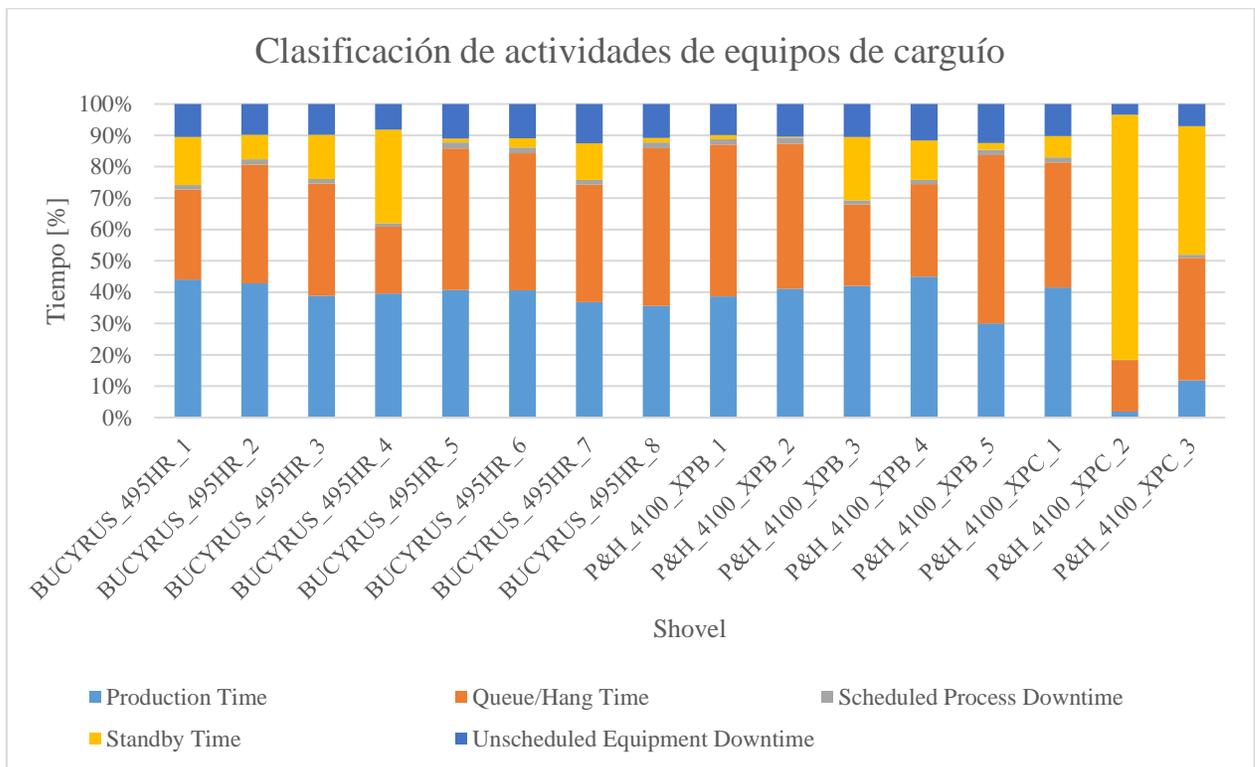
Actividad	Tiempo	
	[h]	[%]
<b>Inicio turno día</b>	0.3	1.35%
<b>Inicio turno noche</b>	0.3	1.30%
<b>Colación día</b>	0.5	2.10%
<b>Colación noche 1</b>	0.2	1.04%
<b>Colación noche 2</b>	0.2	0.90%
<b>Mantenimiento no programada</b>	1.7	6.90%
<b>Mantenimiento programada</b>	1.6	6.70%
<b>Petroleo</b>	0.2	0.74%
<b>Tiempo en colas</b>	0.8	3.50%
<b>Tiempo en reserva</b>	1.1	4.58%
<b>Horas operativas efectivas (sin tiempos de cola)</b>	17.0	70.90%
<b>Total</b>	24.0	100.00%

Los camiones, de acuerdo a los parámetros ingresados, alcanzan un 13.60% de tiempo en mantenimiento (3.3 [h] del día) y cumplen, en promedio 3.50% del tiempo de simulación en colas.

**Tabla N° 5-6: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2025.**

	Comprometido LoA19	Simulación Año 2025
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.0	86.4
<b>Utilización [%]</b>	83.0	83.2

Se tiene una disponibilidad mecánica y utilización acorde a lo comprometido (dentro del margen de error aceptado).



**Gráfico N° 5-12: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2025.**

A partir del gráfico anterior, se puede ver que las palas BUCYRUS 495 5, BUCYRUS 495 6, BUCYRUS 495 8, P&H 4100 XPB 1, P&H 4100 XPB 2 y P&H 4100 XPB 5, a pesar de tener muy poco tiempo en reserva, no alcanzan la producción deseada debido a que estas palas están asociadas a camiones con destinos más lejanos.

### 5.1.3 FY 2026

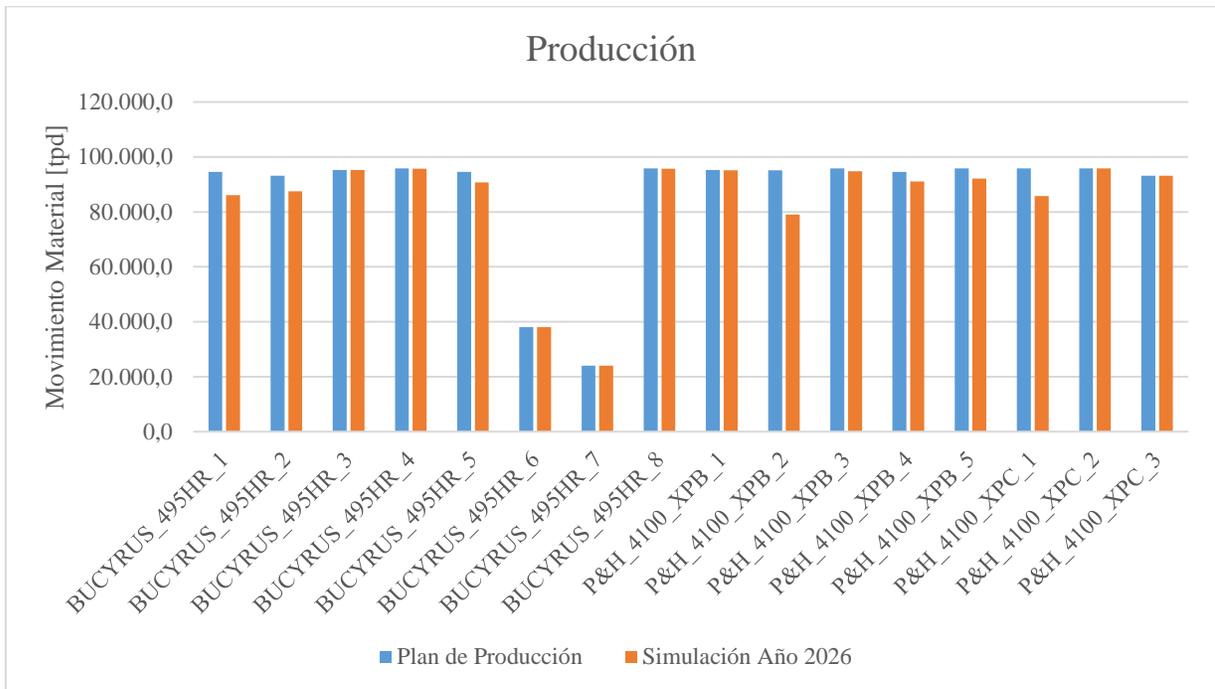
El FY 2026 considera el uso de 164 camiones, de los cuales, por proporción, se consideran 118 CAT 797 y 46 Komatsu 960E.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-7: Producción simulación caso base, 2026.**

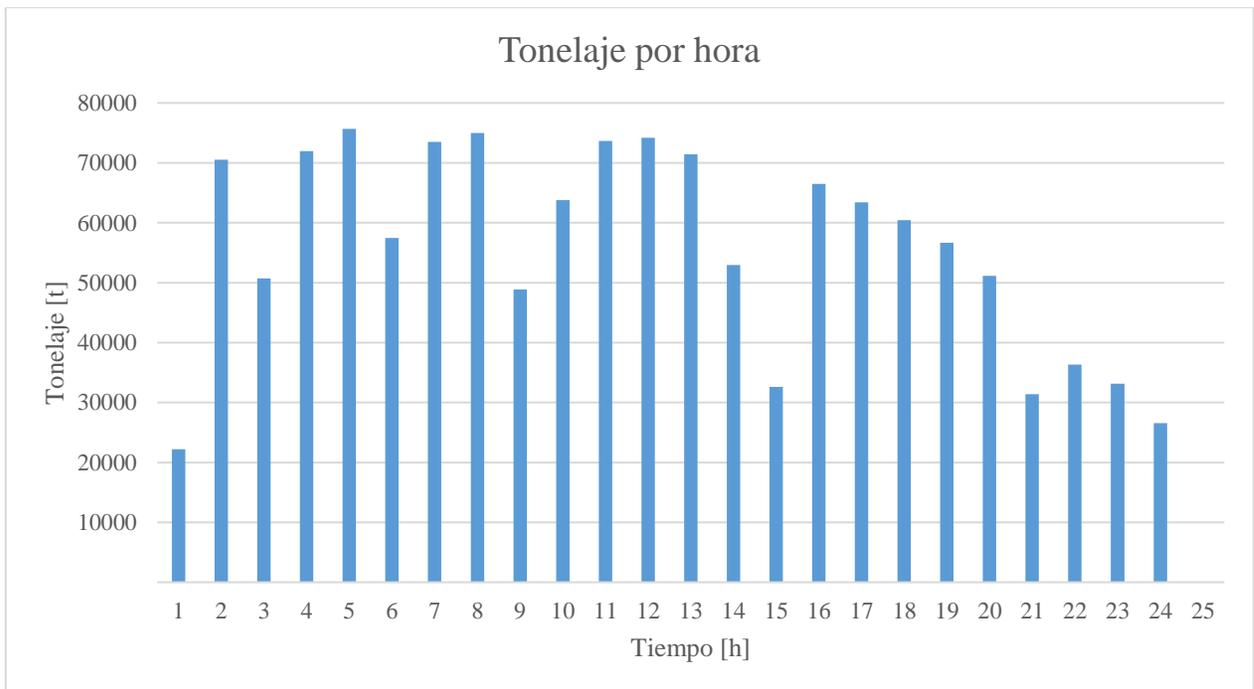
	Escondida	Escondida Norte	Total
<b>Producción planificada [t]</b>	1,004,971	387,948	1,392,919
<b>Producción simulaciones [t]</b>	961,754	378,342	1,340,096
<b>Cumplimiento [%]</b>	95.7	97.5	96.2

La entrada de la fase En12 de Escondida Norte, genera un aumento en los tiempos de ciclo promedio de camiones en Escondida Norte y hace disminuir la brecha entre el cumplimiento de esta con Escondida.



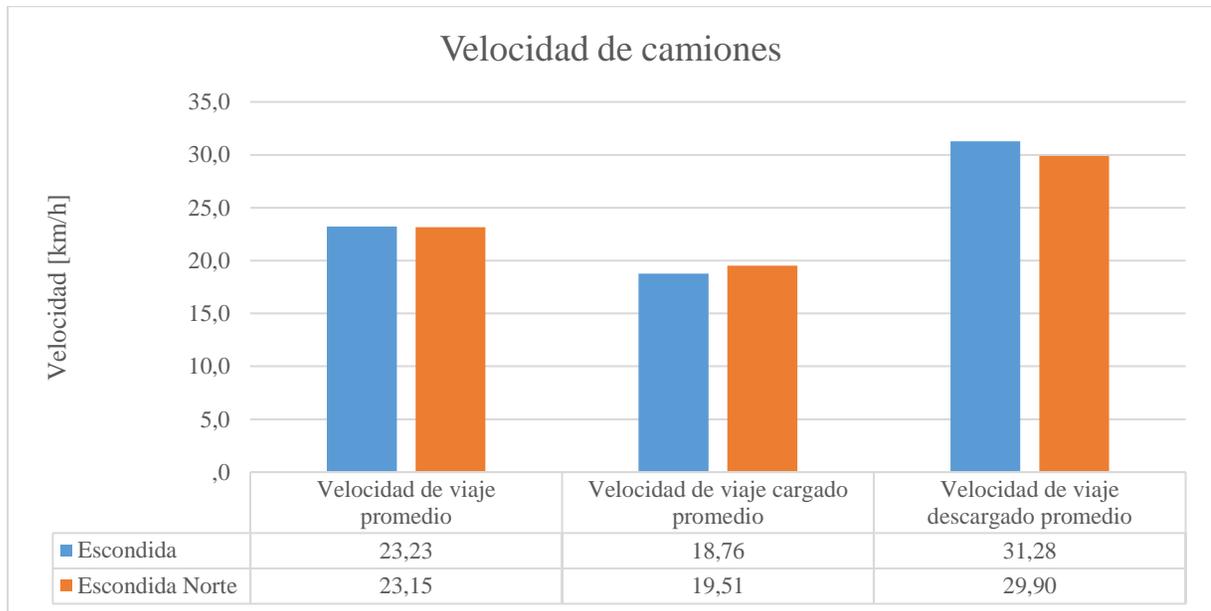
**Gráfico N° 5-13: Producción FY 2026 vs planificada.**

Las palas asociadas a distancias de ciclo mayores (BUCYRUS\_495HR\_1, P&H\_4100\_XPB\_3, P&H\_4100\_XPB\_5 y P&H\_4100\_XPC\_1), tienen cumplimiento menores que el resto de los equipos de carguío. En total, se tiene un cumplimiento de un 96.2% del tonelaje planificado.



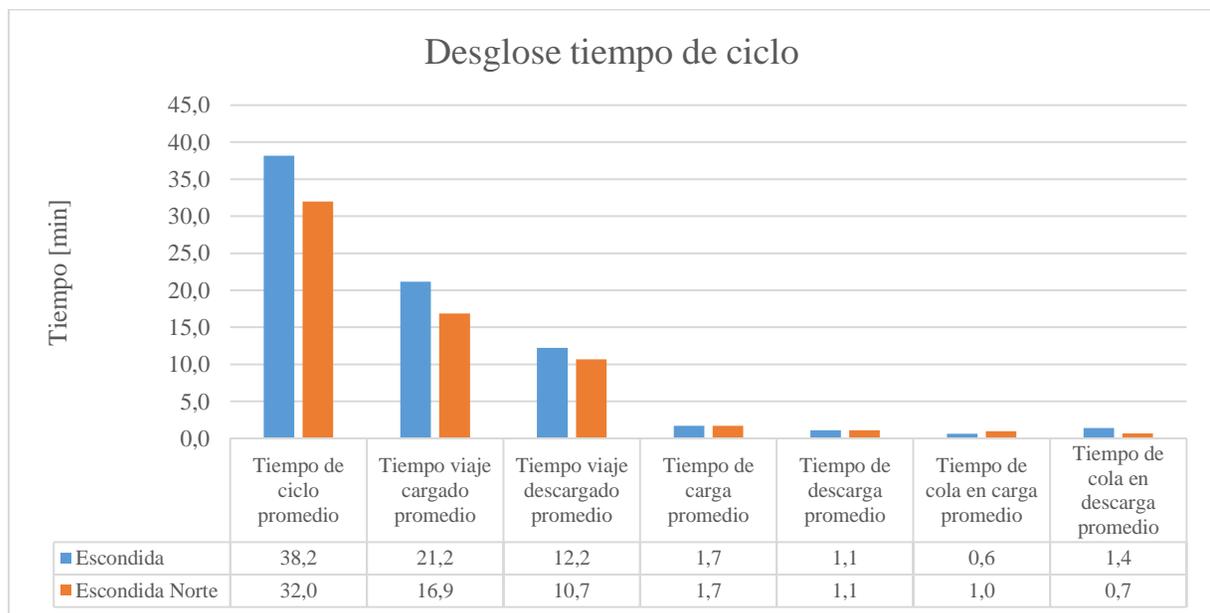
**Gráfico N° 5-14: Tonelaje por hora de simulación, FY 2026.**

Se puede apreciar nuevamente que, en las primeras horas de operación, se alcanza una mayor cantidad de toneladas transportadas por los camiones que en horas más al término del día, dado al privilegio los destinos que tienen tiempos de ciclo menores. Se tiene un *peak* de 75,667 [t/h] de producción del sistema.



**Gráfico N° 5-15: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2026.**

De acuerdo a los circuitos que deben recorrer los camiones para este año y los perfiles de velocidad ingresados al proyecto, se tiene una velocidad promedio del sistema de 22.76 [km/h].



**Gráfico N° 5-16: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2026.**

La diferencia entre el tiempo de ciclo de Escondida y Escondida Norte disminuyen (38.2 [min] y 32 [min]). En promedio, se tienen tiempos de espera en cola de 0.45 [min] en carga y 1.23 [min] en descarga de material.

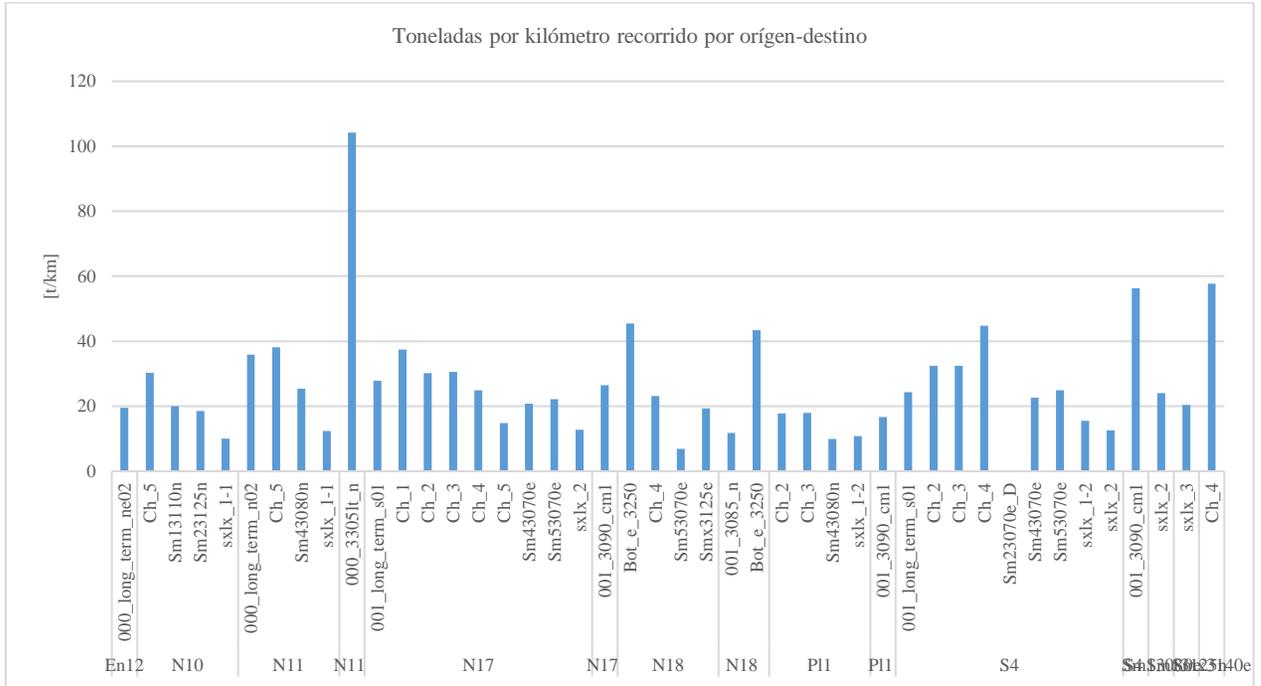


Gráfico N° 5-17: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2026.

A partir de la información obtenida, se tiene 24.55 [t/ km recorrido] que cumplen los camiones en promedio en la operación.

Tabla N° 5-8: Tiempo de actividades de camiones, FY 2026.

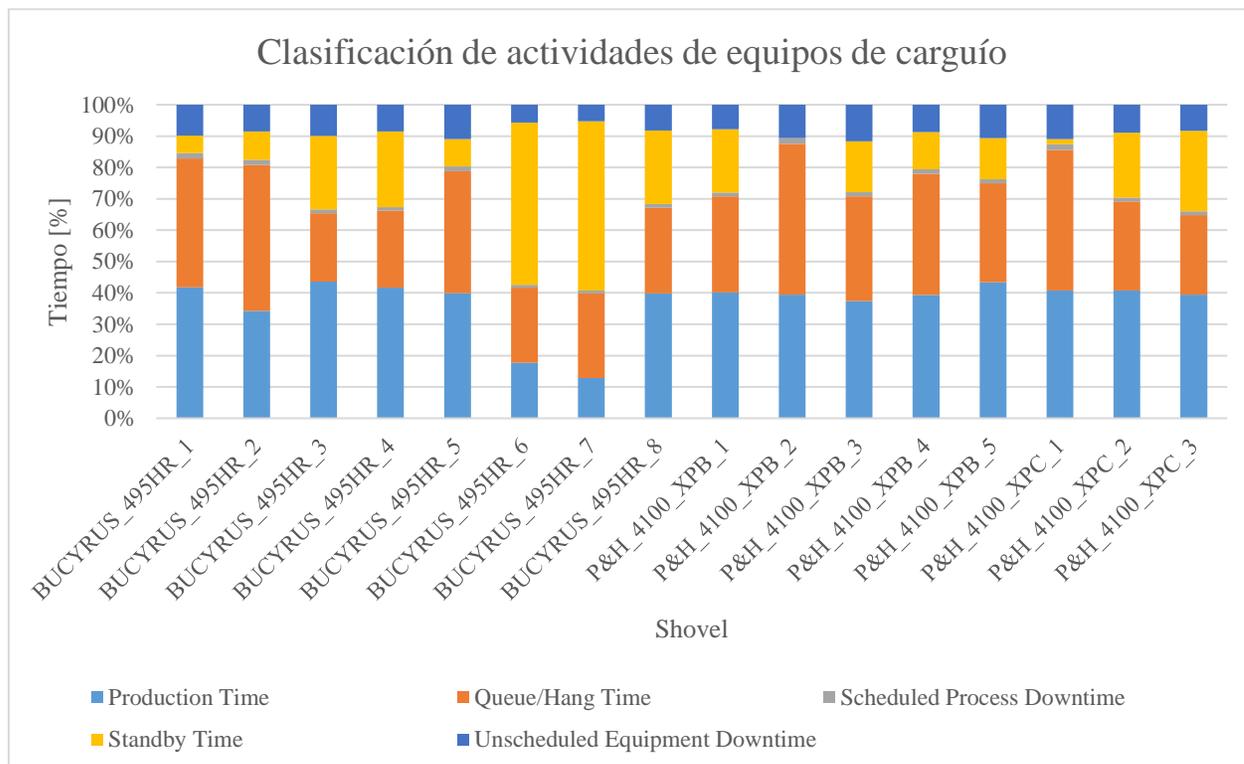
Actividad	Tiempo	
	[h]	[%]
Inicio turno día	0.2	1.02%
Inicio turno noche	0.3	1.35%
Colación día	0.5	2.10%
Colación noche 1	0.2	1.02%
Colación noche 2	0.2	0.90%
Mantenimiento no programada	1.6	6.78%
Mantenimiento programada	1.7	7.19%
Petroleo	0.2	0.70%
Tiempo en colas	0.7	2.85%
Tiempo en reserva	1.8	7.61%
Horas operativas efectivas (sin tiempos de cola)	16.4	68.48%
<b>Total</b>	<b>24.0</b>	<b>100.00%</b>

Los camiones, de acuerdo a los parámetros ingresados, alcanzan un 13.97% de tiempo en mantenimiento (3.3 [h] del día) y cumplen, en promedio 2.85% del tiempo de simulación en colas.

**Tabla N° 5-9: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2026.**

	<b>Comprometido LoA19</b>	<b>Simulación Año 2026</b>
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.0	86.0
<b>Utilización [%]</b>	83.0	82.1

Se tiene una disponibilidad mecánica que alcanza lo comprometido, pero una utilización un poco baja con respecto al objetivo.



**Gráfico N° 5-18: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2026.**

A partir del gráfico anterior, se puede ver que las palas P&H\_4100\_XPB\_2 y P&H\_4100\_XPC\_1, a pesar de tener muy poco tiempo en reserva, no alcanzan la producción deseada debido a que estas palas están asociadas a camiones con destinos más lejanos.

#### 5.1.4 FY 2027

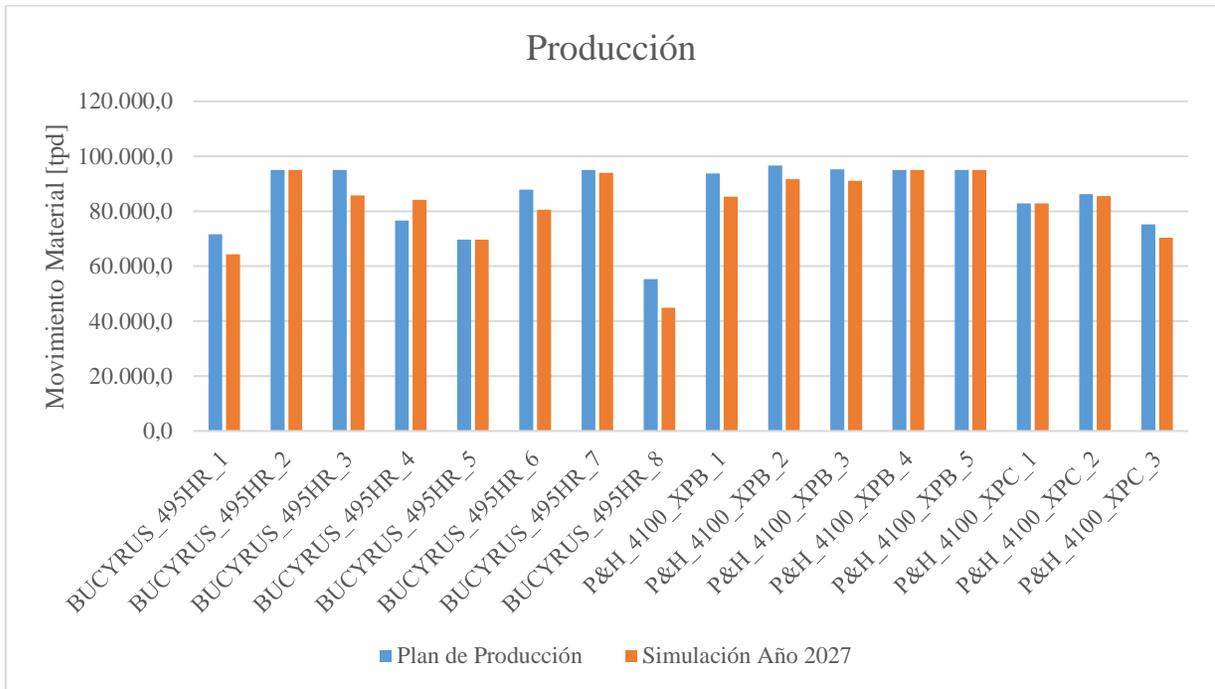
El FY 2027 considera el uso de 155 camiones, de los cuales, por proporción, se consideran 112 CAT 797 y 43 Komatsu 960E.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-10: Producción simulación caso base, 2027.**

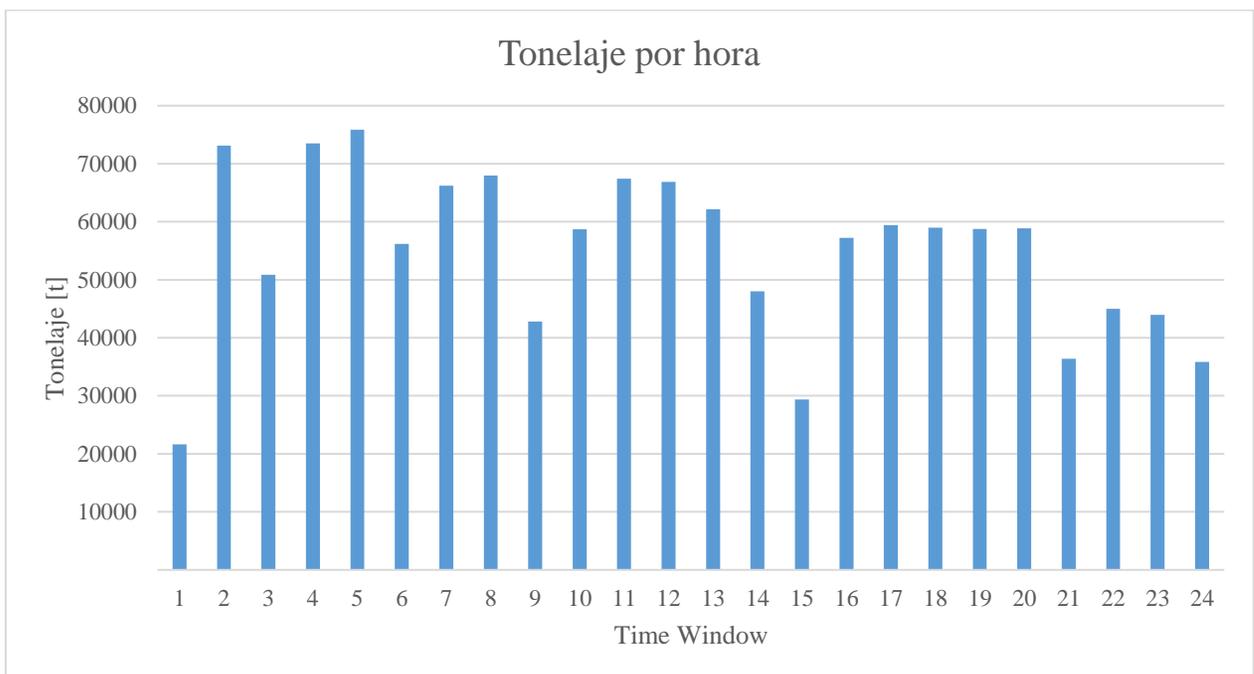
	<b>Escondida</b>	<b>Escondida Norte</b>	<b>Total</b>
<b>Producción planificada [t]</b>	883,424	482,566	1,365,990
<b>Producción simulaciones [t]</b>	856,840	458,089	1,314,928
<b>Cumplimiento [%]</b>	97.0	94.9	96.3

El desarrollo de las fases N18 y P11s en Escondida hace disminuir el tiempo promedio de ciclo de camiones este rajo, el cual se equipara con el de Escondida Norte que desarrolla las fases En12 y En13. Esto genera que Escondida tenga un mayor cumplimiento que Escondida Norte.



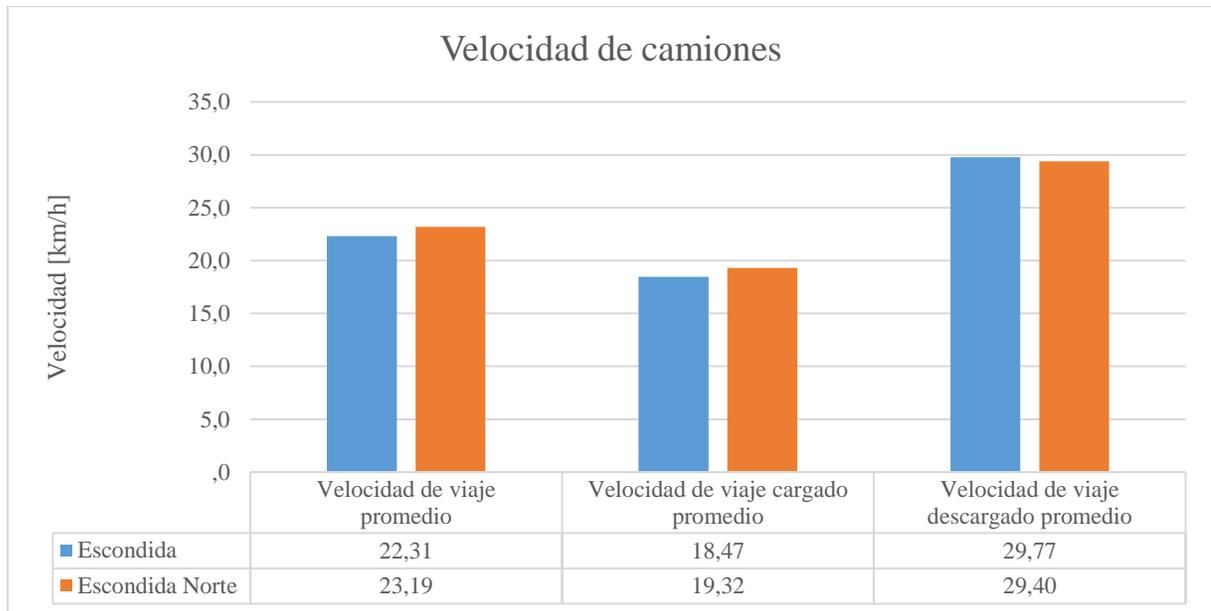
**Gráfico N° 5-19: Producción FY 2027 vs planificada.**

Se puede apreciar que se alcanza un alto nivel de cumplimiento con respecto a lo planificado (96.3%). La pala que más presenta diferencias es la P&H\_4100\_XPB\_1 y se explica por la saturación de los chancadores 2 y 3, los cuales son los destinos del mineral de ésta.



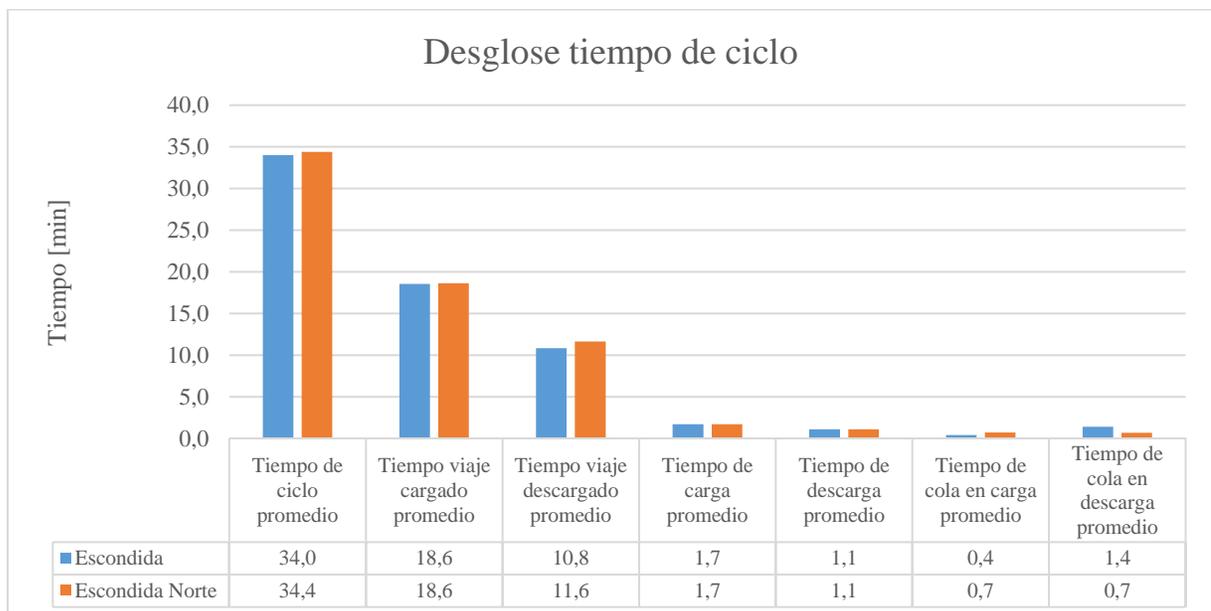
**Gráfico N° 5-20: Tonelaje por hora de simulación, FY 2027.**

Al comienzo de la simulación se obtiene una mayor cantidad de toneladas transportadas por los camiones que en horas más al término del día, dado al privilegio los destinos que tienen tiempos de ciclo menores. Se aprecia un *peak* de 75.852 [t/h] de producción del sistema.



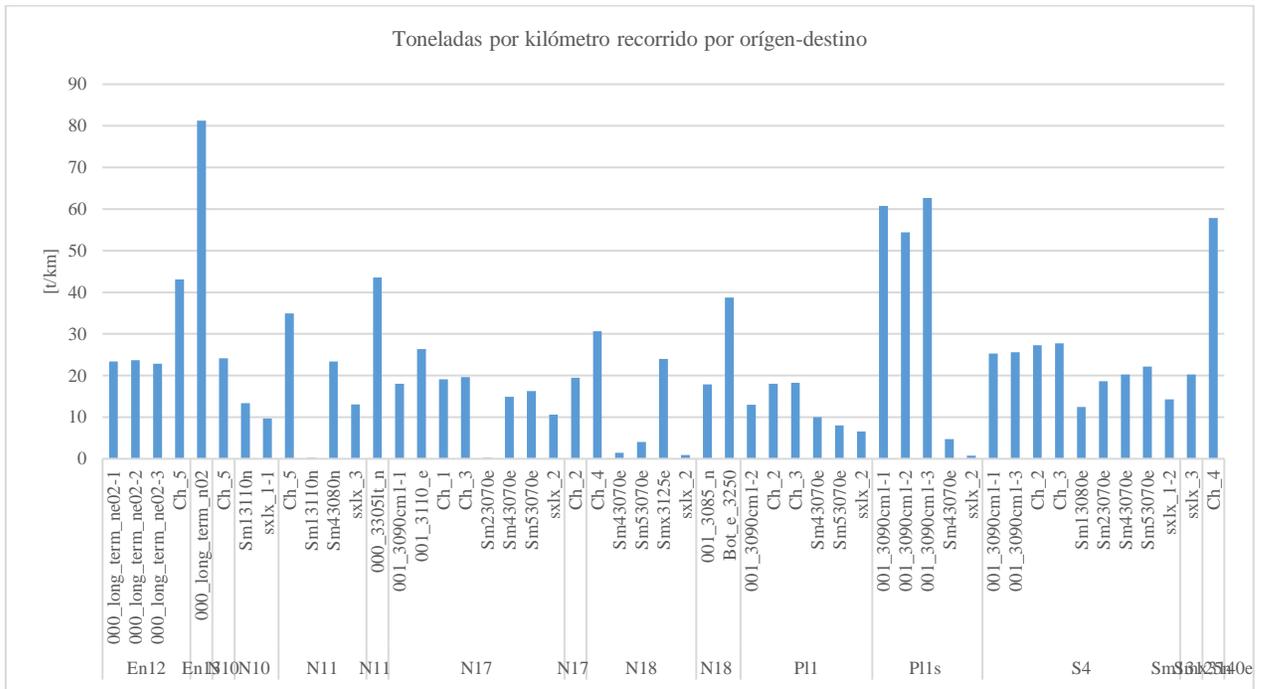
**Gráfico N° 5-21: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2027.**

De acuerdo a los circuitos que deben recorrer los camiones para este año y los perfiles de velocidad ingresados al proyecto, se tiene una velocidad promedio del sistema de 22.62 [km/h].



**Gráfico N° 5-22: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2027.**

Se obtuvo un tiempo de ciclo promedio de 34.1 [min] en el sistema global (Escondida y Escondida Norte equiparan tiempos de ciclo). En promedio, se tienen tiempos de espera en cola de 0.50 [min] en carga y 1.16 [min] en descarga de material.



**Gráfico N° 5-23: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2027.**

A partir de la información obtenida, se tiene 22.51 [t/ km recorrido] que cumplen los camiones en promedio en la operación.

**Tabla N° 5-11: Tiempo de actividades de camiones, FY 2027.**

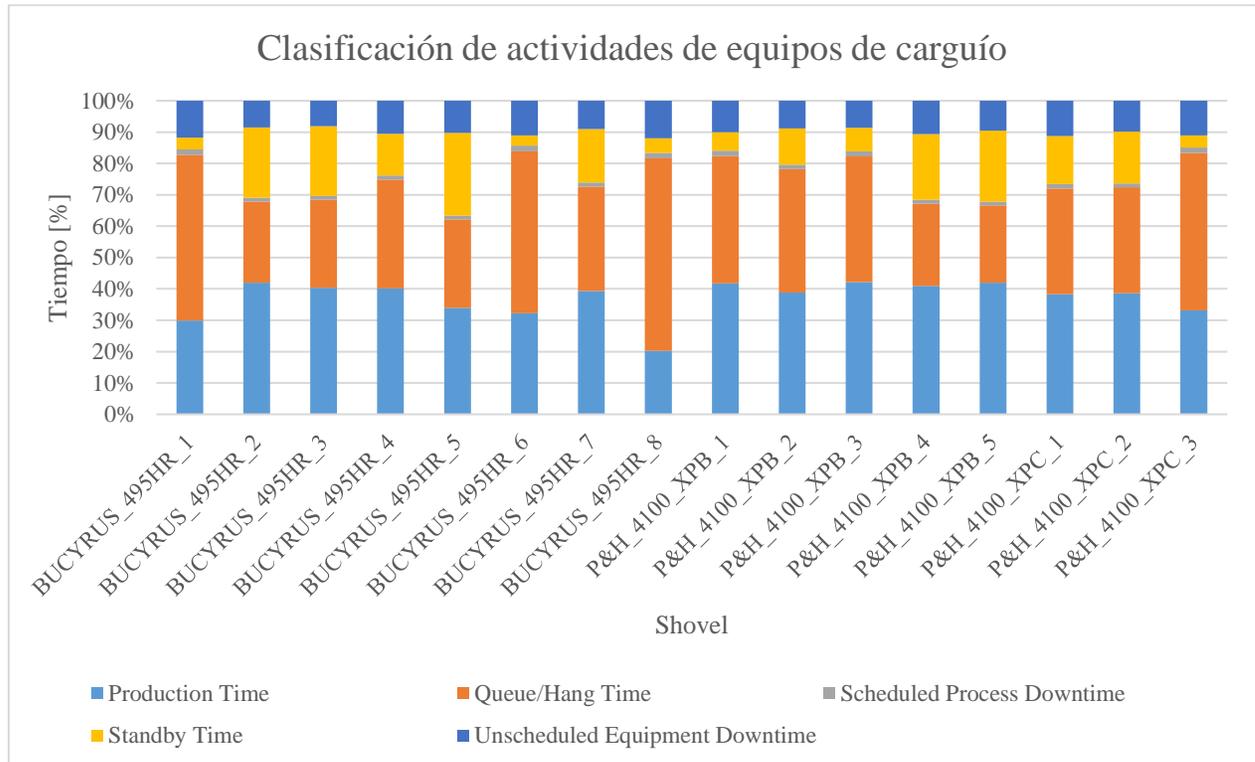
Actividad	Tiempo	
	[h]	[%]
<b>Inicio turno día</b>	0.3	1.36%
<b>Inicio turno noche</b>	0.3	1.32%
<b>Colación día</b>	0.5	2.10%
<b>Colación noche 1</b>	0.2	1.04%
<b>Colación noche 2</b>	0.2	0.89%
<b>Mantenimiento no programada</b>	1.6	6.81%
<b>Mantenimiento programada</b>	1.7	6.93%
<b>Petroleo</b>	0.2	0.72%
<b>Tiempo en colas</b>	0.8	3.18%
<b>Tiempo en reserva</b>	1.2	5.17%
<b>Horas operativas efectivas (sin tiempos de cola)</b>	16.9	70.48%
<b>Total</b>	24.0	100.00%

Los camiones, de acuerdo a los parámetros ingresados, alcanzan un 13.74% de tiempo en mantenimiento (3.3 [h] del día) y cumplen, en promedio 3.18% del tiempo de simulación en colas.

**Tabla N° 5-12: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2027.**

	<b>Comprometido LoA19</b>	<b>Simulación Año 2027</b>
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.0	86.2
<b>Utilización [%]</b>	83.0	82.9

Se alcanza una disponibilidad mecánica y utilización de acuerdo a lo comprometido para tal año.



**Gráfico N° 5-24: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2027.**

A partir del gráfico anterior, se puede notar que, a diferencia de los años simulados previos, todas las palas tienen una porción de tiempo en *stand-by*, acorde al nivel de cumplimiento con respecto a lo planificado de esta simulación.

### 5.1.5 FY 2028

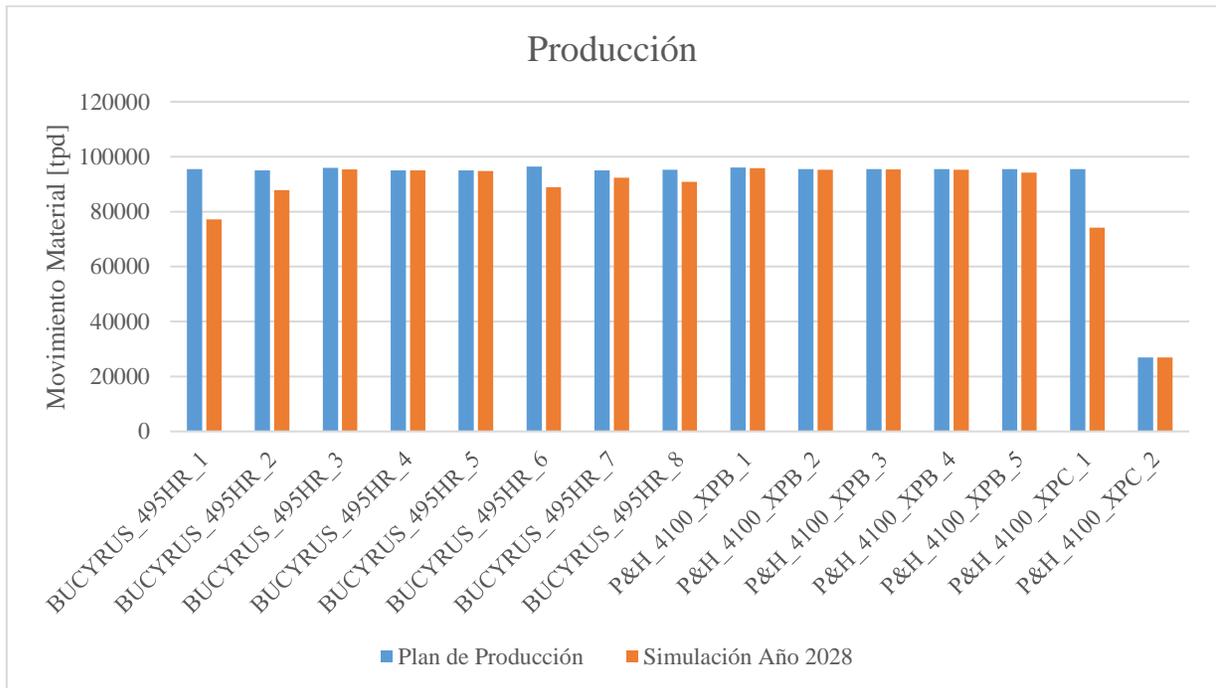
El FY 2028 considera el uso de 161 camiones, de los cuales, por proporción, se consideran 116 CAT 797 y 45 Komatsu 960E.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-13: Producción simulación caso base, 2028.**

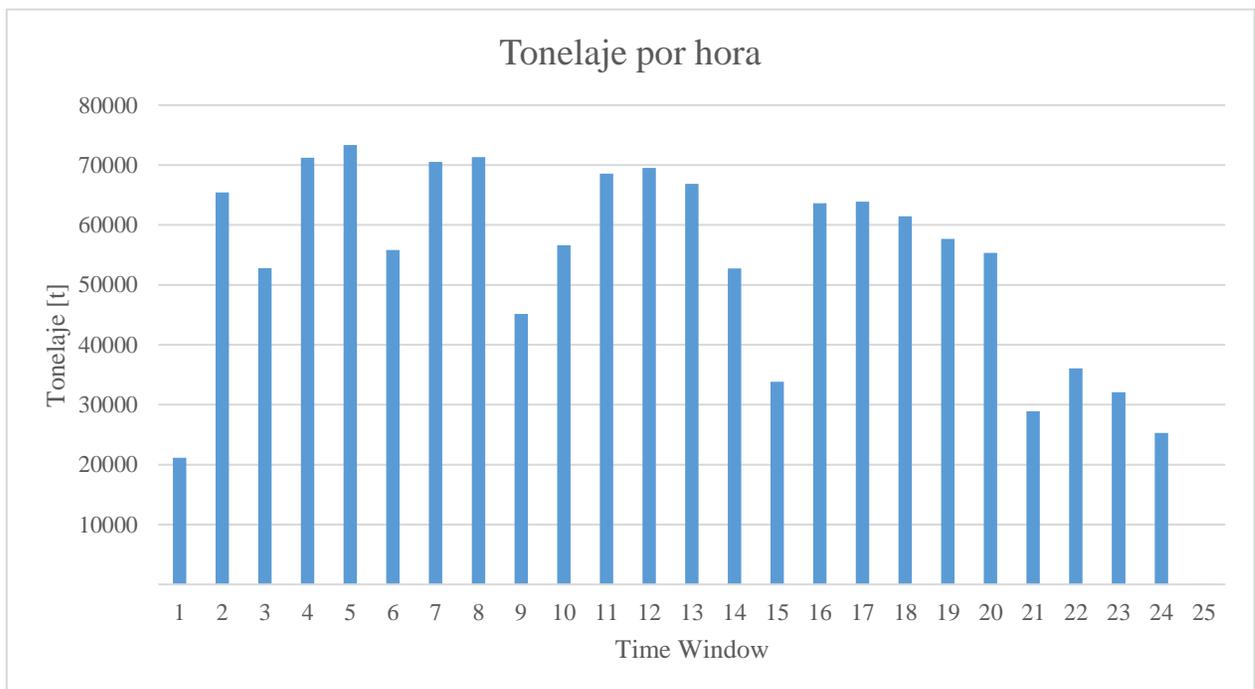
	<b>Escondida</b>	<b>Escondida Norte</b>	<b>Total</b>
<b>Producción planificada [t]</b>	886,089	477,304	1,363,393
<b>Producción simulaciones [t]</b>	840,649	457,761	1,298,410
<b>Cumplimiento [%]</b>	94.9	95.9	95.2

La profundización de la fase S4 en Escondida aumenta los tiempos de ciclo promedio de camiones en ésta y nuevamente Escondida Norte presenta un mayor cumplimiento.



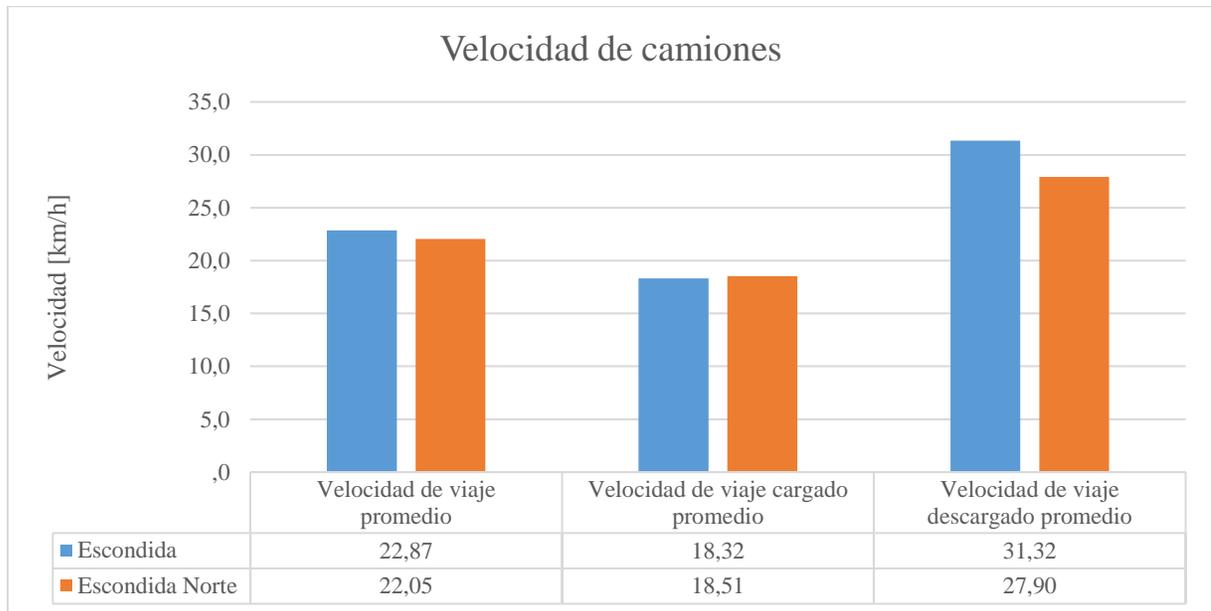
**Gráfico N° 5-25: Producción FY 2028 vs planificada.**

Nuevamente, las palas asociadas a distancias de ciclo mayores (BUCYRUS\_495HR\_1 y P&H\_4100\_XPC\_1), tienen cumplimiento menores que el resto de los equipos de carguío. En total, se tiene un cumplimiento del 95.3%.



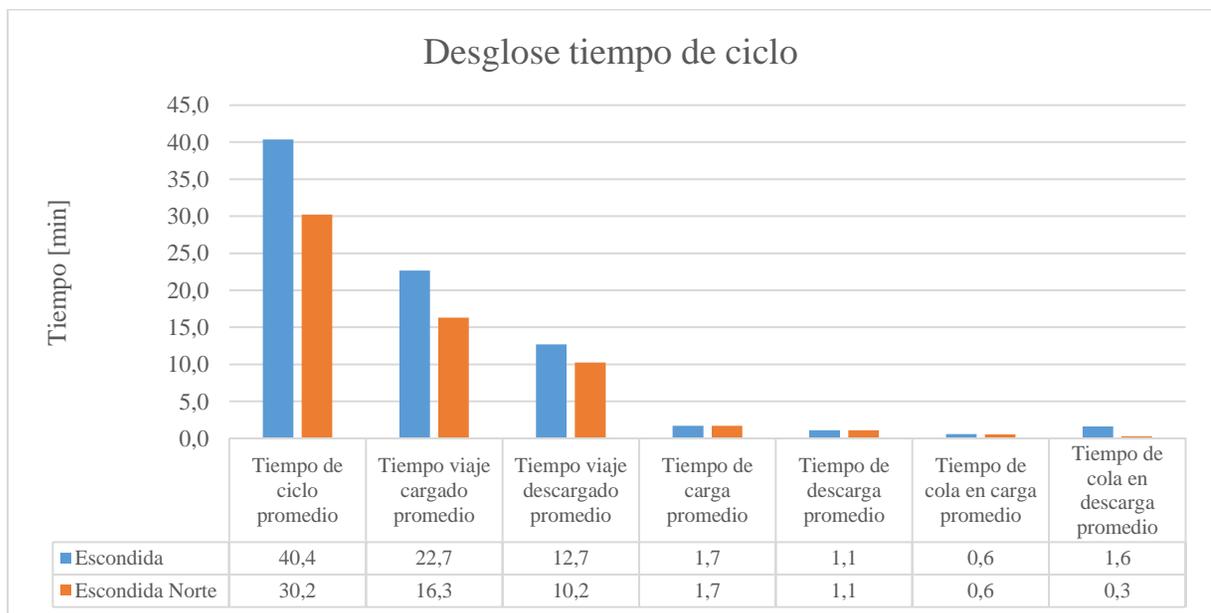
**Gráfico N° 5-26: Tonelaje por hora de simulación, FY 2028.**

Como se ha visto en todos los casos base, existe una tendencia a la disminución de toneladas producidas por hora, dado al privilegio de los camiones a ser asignados a circuitos más cortos (en distancia). Se aprecia un *peak* de 73.354 [t/h] de producción del sistema.



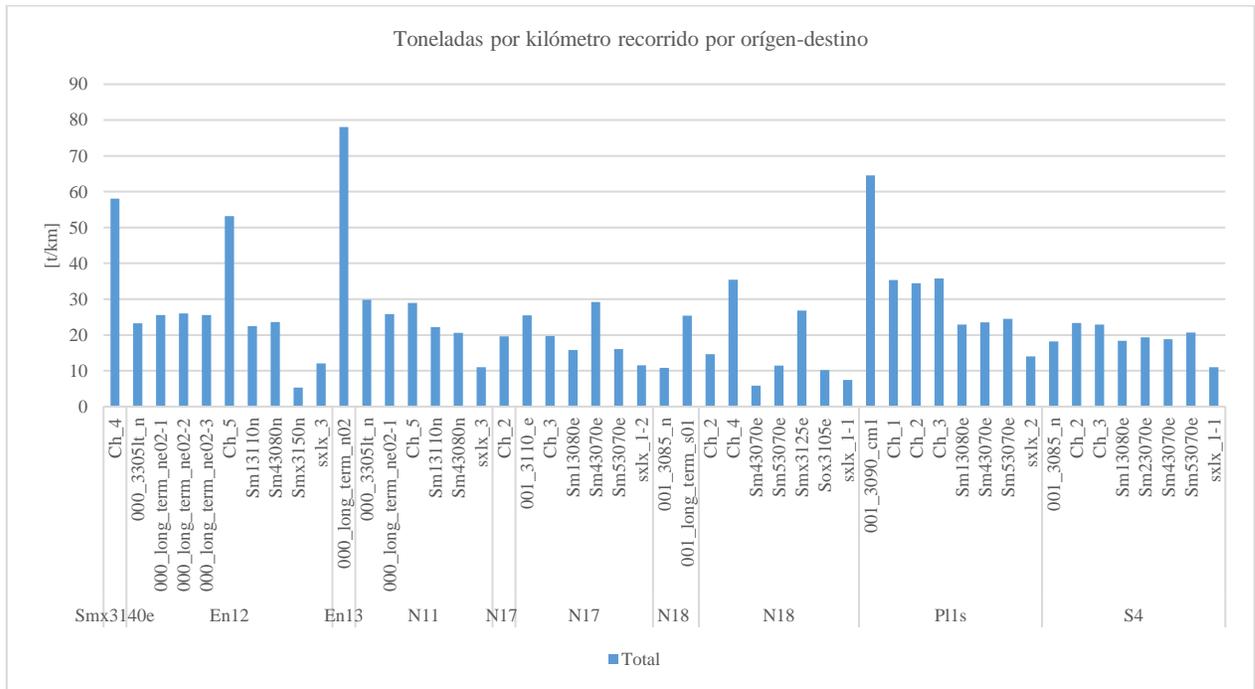
**Gráfico N° 5-27: Promedio de velocidad en ciclos de camiones, FY 2028.**

De acuerdo a los circuitos que deben recorrer los camiones para este año y los perfiles de velocidad ingresados al proyecto, se tiene una velocidad promedio del sistema de 22.53 [km/h].



**Gráfico N° 5-28: Desglose tiempo de ciclo promedio, FY 2028.**

Escondida nuevamente vuelve a presentar tiempos de ciclo mayores que Escondida Norte (40.4 [min] vs 30.2 [min]). En promedio, se tienen tiempos de espera en cola de 0.57 [min] en carga y 1.05 [min] en descarga de material.



**Gráfico N° 5-29: Tonelada por km recorrido por circuito, FY 2028.**

A partir de la información obtenida, se tiene 23.23 [t/ km recorrido] que cumplen los camiones en promedio en la operación.

**Tabla N° 5-14: Tiempo de actividades de camiones, FY 2028.**

Actividad	Tiempo	
	[h]	[%]
<b>Inicio turno día</b>	0.3	1.36%
<b>Inicio turno noche</b>	0.3	1.31%
<b>Colación día</b>	0.5	2.11%
<b>Colación noche 1</b>	0.3	1.05%
<b>Colación noche 2</b>	0.2	0.88%
<b>Mantenimiento no programada</b>	1.6	6.83%
<b>Mantenimiento programada</b>	1.7	7.26%
<b>Petroleo</b>	0.2	0.72%
<b>Tiempo en colas</b>	0.5	2.12%
<b>Tiempo en reserva</b>	1.9	7.94%
<b>Horas operativas efectivas (sin tiempos de cola)</b>	16.4	68.42%
<b>Total</b>	24.0	100.00%

Los camiones, de acuerdo a los parámetros ingresados, alcanzan un 14.09% de tiempo en mantenimiento (3.3 [h] del día) y cumplen, en promedio 2.12% del tiempo de simulación en colas.

Tabla N° 5-15: Índices operacionales de camiones vs comprometidos, FY 2028.

	Comprometido LoA19	Simulación Año 2028
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	85.9
Utilización [%]	83.0	81.2

Se tiene una disponibilidad mecánica que alcanza el valor comprometido, pero una utilización un poco baja con respecto al objetivo.

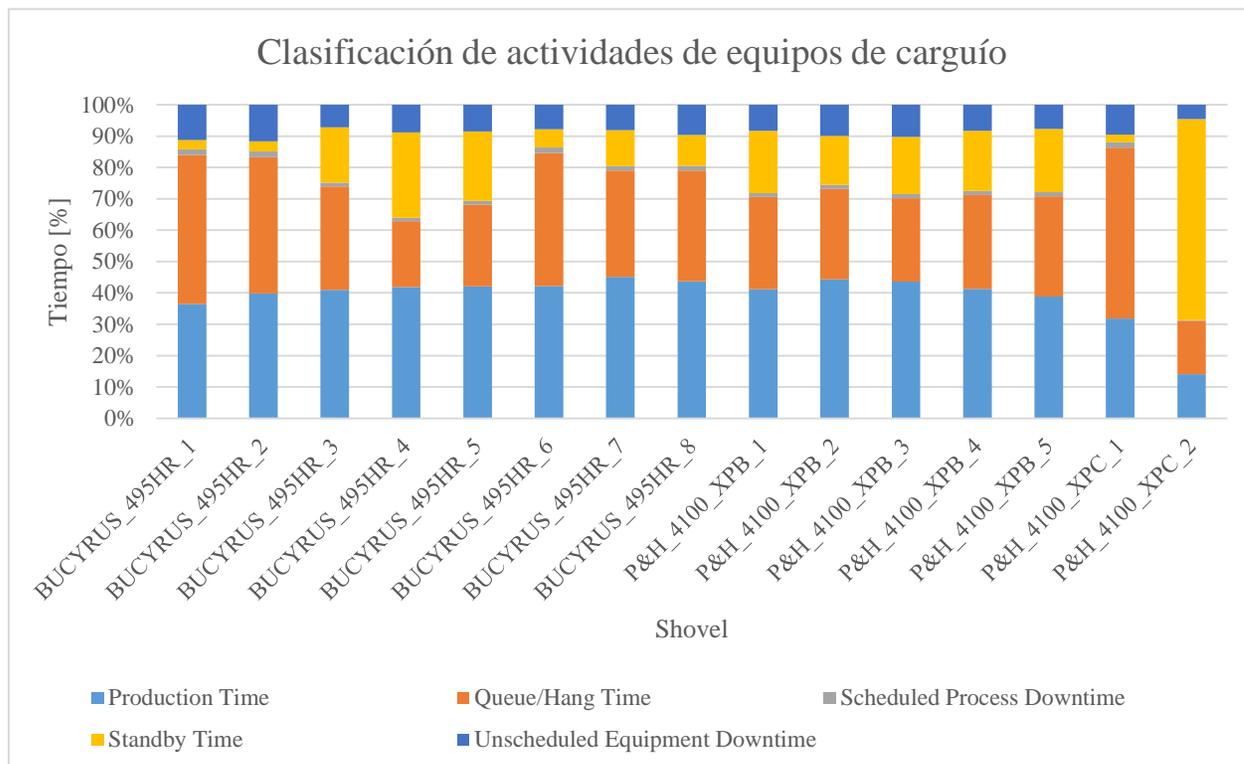


Gráfico N° 5-30: Tiempo ocupado en actividades por palas, FY 2028.

A partir del gráfico anterior, se puede notar que todas las palas tienen una porción de tiempo en *stand-by*, acorde al nivel de cumplimiento con respecto a lo planificado de esta simulación.

## 5.2 Casos con proyecto

El estudio de los casos que integraban la tecnología de camiones autónomos consideró, en primera instancia, correr la simulación con igual cantidad de camiones que en el caso base. Para definir cuántos camiones se debían tener trabajando en cada sistema independiente (recordar que cada sistema de camiones autónomos tiene rutas exclusivas definidas para cada caso), se consideró la recomendación de horas camión que requería cada fase a extraer presente en el proyecto de *MineHaul2* (especificado anteriormente) y luego, a partir de esta recomendación de número de camiones, se fue modificando manualmente la cantidad en cada sistema hasta alcanzar la **mayor producción** posible.

Al correr las simulaciones con la misma cantidad de equipos que en los casos base, los camiones autónomos, al no tener necesidad realizar detenciones para colación o cambio de turno,

presentan un alto tiempo de reserva (y por lo tanto una baja utilización a lo esperado). Es por esta razón que, para los años 2024 y 2025, en el caso de Escondida Norte se corrieron simulaciones disminuyendo la cantidad de camiones autónomos en operación en 2 unidades y para los años 2026, 2027 y 2028, se disminuyó la cantidad en cada uno de los tres sistemas independientes (manuales o autónomos, dependiendo del caso).

### 5.2.1 FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

La separación de rutas para camiones manuales y autónomos no presentó gran dificultad en este caso, ya que cada sistema (Escondida y Escondida Norte) tiene sus propios stocks, botaderos y chancadores a los cuales se puede enviar material de manera independiente.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se crean stocks intermedios, cercanos al rajo Escondida Norte, para mineral que se envía al chancador 4 (mineral oxidado). El plan considera que la flota de camiones autónomos deposita este mineral en estos destinos (dividido en mineral con y sin presencia de arcilla) y luego es remanejado de manera que la flota manual lo lleve a su destino.

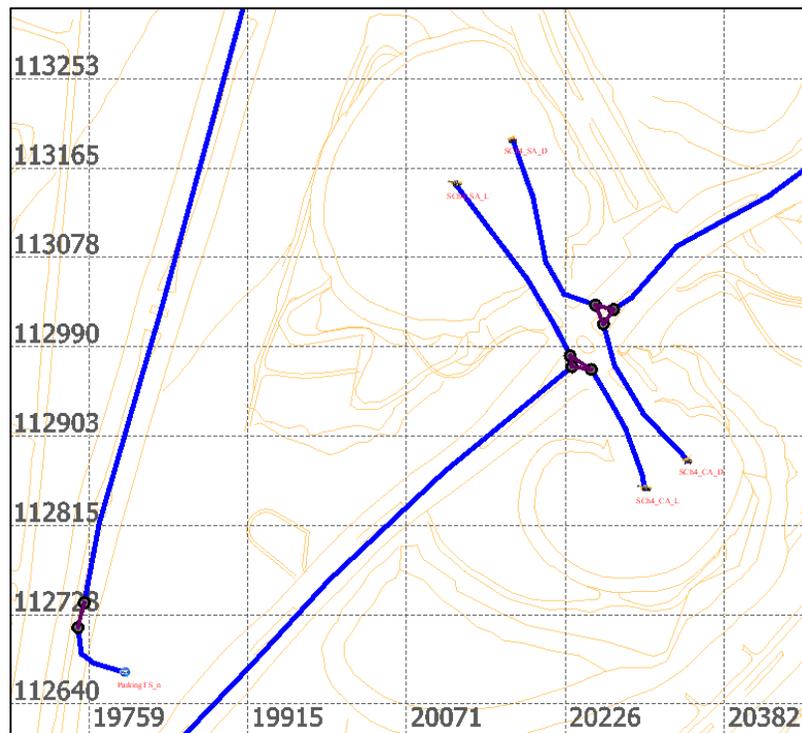


Figura N° 5-1: Stocks intermedios de mineral de cobre oxidado con y sin arcilla, 2024.

- ❖ Se envía el mineral que inicialmente estaba considerado que se transportara desde el rajo principal Escondida al chancador 5 a los chancadores 2 y 3 (dividido de manera proporcional a la capacidad de tratamiento de cada uno de estos chancadores). Esto es posible dada la capacidad remanente de estos chancadores, sin embargo, se debe considerar que se genera una mayor congestión del sistema en tales destinos.

- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existen 2 pisos activos, de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de sistemas autónomos y manuales.

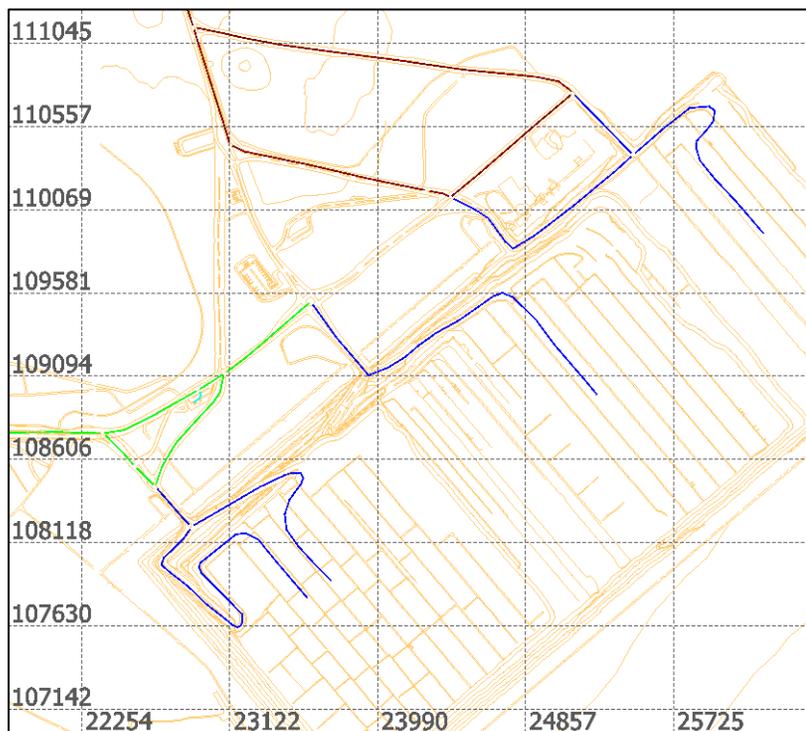


Figura N° 5-2: Dos pisos en pilas de lixiviación dinámica para división camiones autónomos y manuales.

- ❖ Debido al alto costo CAPEX de crear un nuevo taller de mantención de camiones, se considera crear un estacionamiento en una ubicación cercana al circuito de camiones manuales en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena.

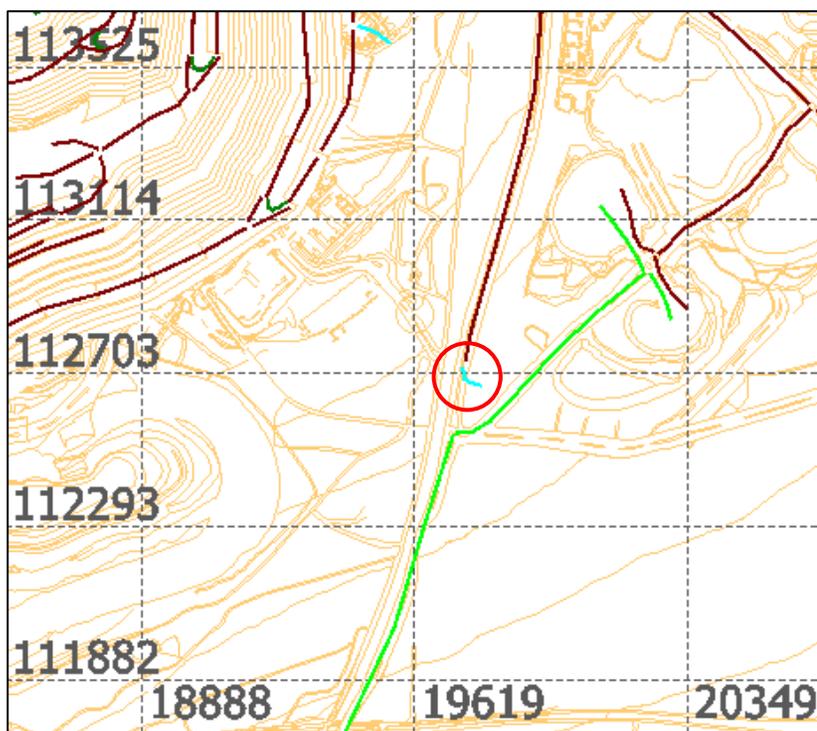


Figura N° 5-3: Estacionamiento camiones autónomos para transporte a *Truck Shop*.

Inicialmente se consideran 165 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

Tabla N° 5-16: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos
	Escondida		Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte autónomo</b>			
Igual número de camiones que CB	38	99	28
1 camión menos en Escondida Norte	38	99	27
2 camiones menos en Escondida Norte	38	99	26

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

Tabla N° 5-17: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.

Simulaciones	Producción Escondida	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
<b>Caso base</b>	969,795	323,174	1,292,969	93.6
<b>Caso Escondida Norte autónomo</b>				
Igual número de camiones CB	962,894	324,653	1,287,548	93.2
1 camión menos en Escondida Norte	958,929	320,580	1,279,509	92.6
2 camiones menos en Escondida Norte	965,411	308,126	1,273,537	92.2

Como se puede observar, la simulación que contempla el uso de la misma cantidad de camiones que en el caso base, alcanza una producción diaria cercana a la que se obtiene en el caso con sólo camiones manuales (5 mil toneladas por día de diferencia). Este caso además es el único,

en comparación a los casos con menor dotación de camiones autónomos, que logra un cumplimiento sobre el 93%.

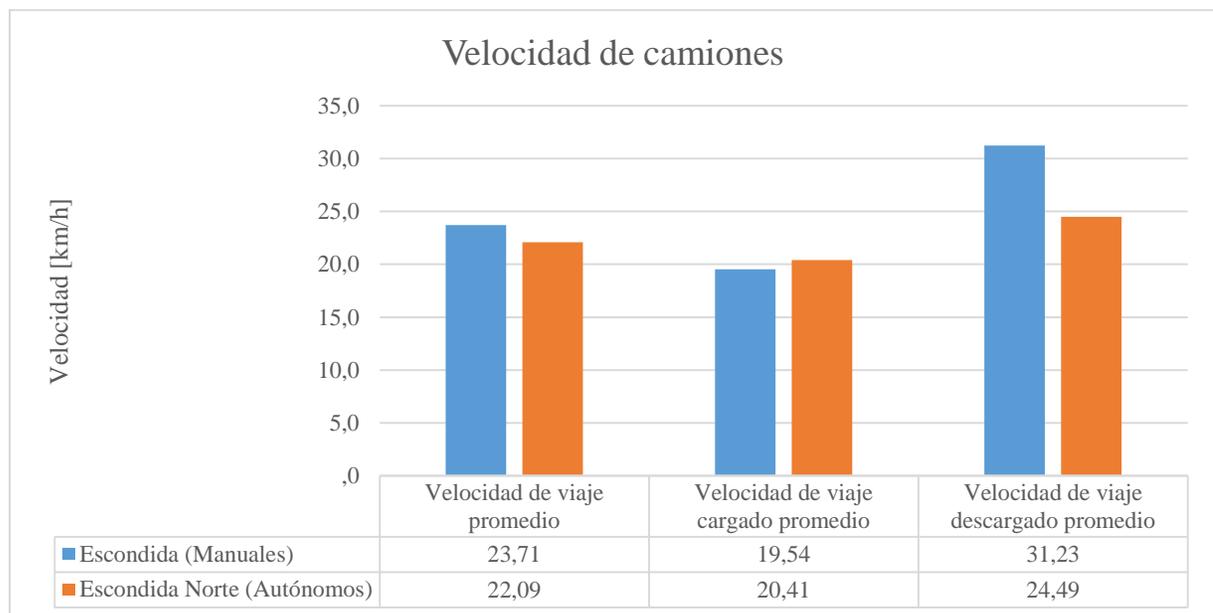
Los índices de rendimiento de cada simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-18: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.**

Simulación	Caso base		Igual N° camiones		1 camión menos en EN		2 camiones menos en EN	
	Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	
Número de camiones	165	137	28	137	27	137	26	
Utilización [%]	82.9	81.7	89.4	81.3	90.1	81.8	91.3	
Disponibilidad mecánica [%]	86.5	86.1	88.4	86.0	88.5	85.9	88.0	
HO efectivas (sin colas) [h]	17.0	16.6	18.8	16.4	18.3	16.5	19.2	
Tiempo promedio en cola [h]	0.8	1.2	0.8	1.2	1.4	1.2	0.8	

A partir de la tabla anterior, se puede notar que:

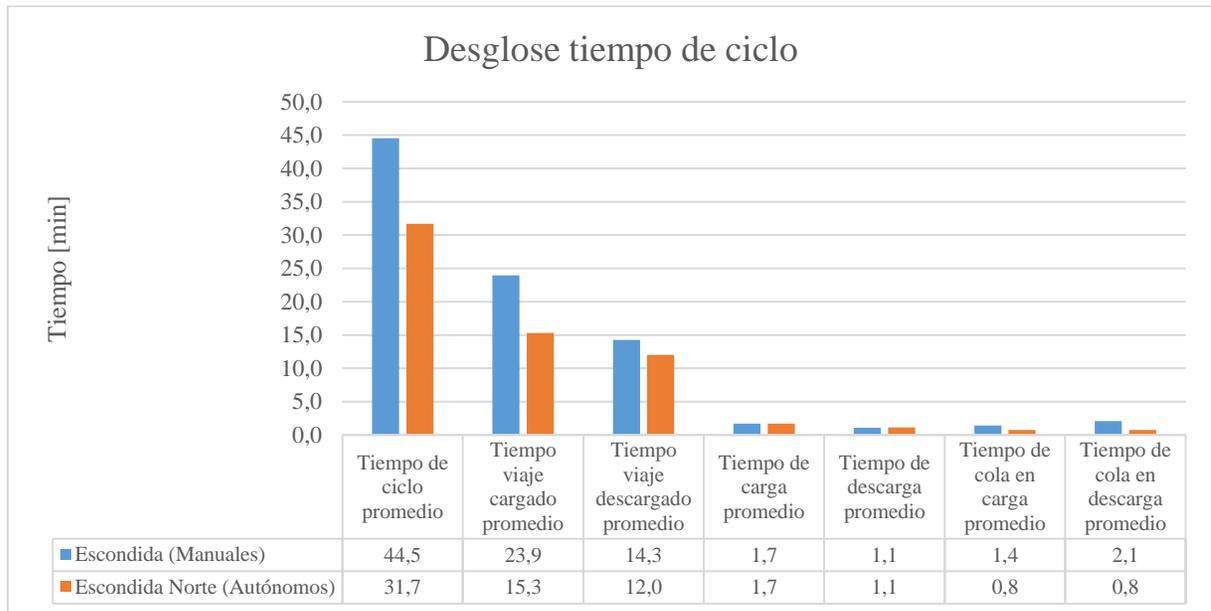
- ❖ Para los camiones manuales, el separar los sistemas genera una pérdida de utilización de los equipos, que se traduce en una menor producción. Esto se debe a la menor flexibilidad que tiene el sistema al restringir las frentes y destinos a los cuales pueden ser enviados los camiones y, por otro lado, a los mayores tiempos de cola que se tienen en promedio (0.4 horas adicionales).
- ❖ Los camiones autónomos alcanzan una utilización mayor dada por una menor cantidad de detenciones programadas, en comparación a equipos operados por conductores (hasta un 6% mayor y 2 horas operativas efectivas adicionales que en el caso base). Esto permite que en el caso con igual dotación de camiones que el caso base, en la zona autónoma se obtenga un tonelaje sobre el del caso base.



**Gráfico N° 5-31: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.**

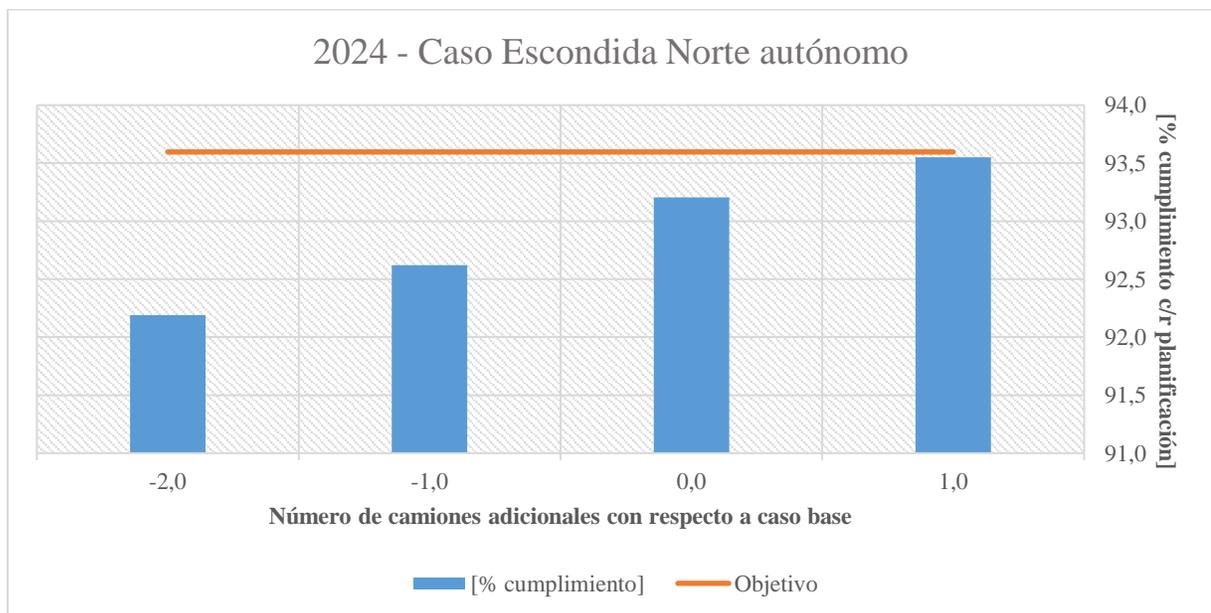
Tal como se esperaba, los camiones autónomos presentan velocidades promedio menores que los equipos manuales (casi 2 [km/h] adicionales en promedio). La diferencia mayor se presenta

en viajes en los cuales los equipos están descargados, donde los equipos manejados por operadores alcanzan una ventaja importante.



**Gráfico N° 5-32: Desglose tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.**

Similar al caso base, los tiempos de ciclo para los viajes de transporte de material en Escondida Norte son menores, dado por la menor distancia entre frentes de extracción y destinos. En la zona autónoma, los camiones con esta tecnología obtienen tiempos de ciclo en promedio mayores que en el caso base (31.7 [min] vs 26.5 [min]).



**Gráfico N° 5-33: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.<sup>6</sup>**

<sup>6</sup> La table con los valores de producción por cada aumento de número de camiones se encuentra en la sección de anexos.

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó un camión autónomo adicional.

### 5.2.2 FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

Al igual que en el caso anterior, la división de los sistemas Escondida y Escondida Norte no es difícil dado a la independencia de los destinos de cada rajo.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se crea un stock intermedio, cercanos al rajo Escondida Norte, para mineral mixto que se envía al chancador 4. El plan considera que la flota de camiones autónomos deposita este mineral en este stock y luego es remanejado a su destino final.
- ❖ El mineral planificado a transportar desde el stock Sob3125n al chancador 4 es tomado por la flota manual de camiones que opera en el rajo Escondida.

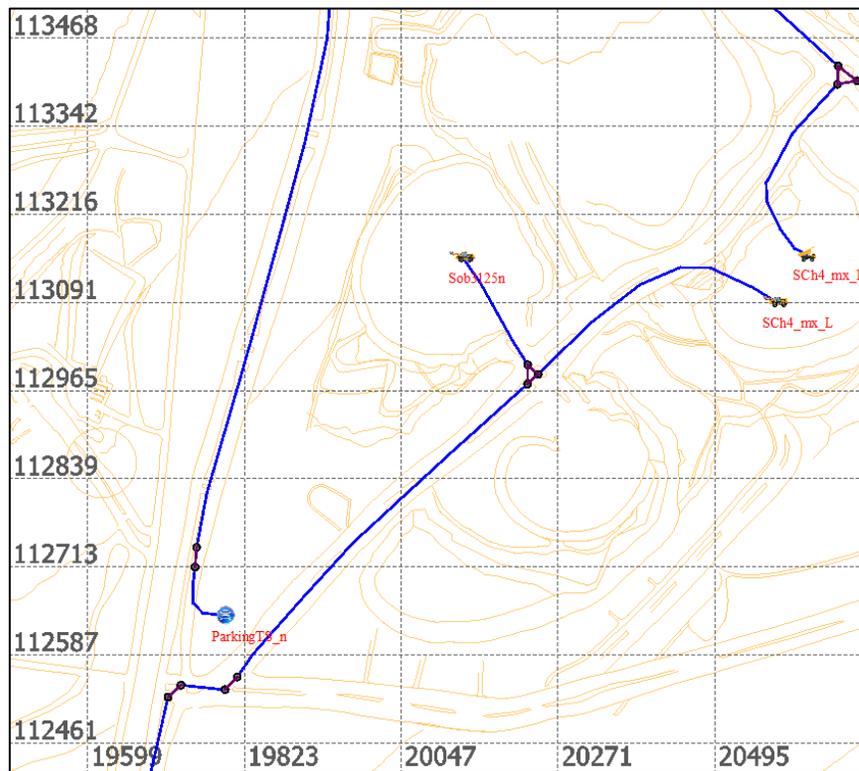


Figura N° 5-4: Stocks intermedios de mineral mixto y Sob3125n.

- ❖ El mineral de Escondida que tenía como destino el chancador 5 se envía a los chancadores 2 y 3 (de manera proporcional a la capacidad de tratamiento de cada chancador).
- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existan 2 pisos de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de sistemas autónomos y manuales.

- ❖ Se considera establecer un estacionamiento de camiones autónomos en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena, localizado cerca del rajo Escondida.

Inicialmente se consideran 139 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-19: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos
	Escondida		Escondida Norte
	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte autónomo</b>			
Igual número de camiones que CB	32	85	22
1 camión menos en Escondida Norte	32	85	21
2 camiones menos en Escondida Norte	32	85	20

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenciones planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-20: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Simulación	Producción Escondida	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
Caso base	983,923	283,234	1,267,157	93.3
<b>Caso Escondida Norte autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	984,821	268,047	1,252,867	92.2
1 camión menos en Escondida Norte	982,561	260,125	1,242,686	91.5
2 camiones menos en Escondida Norte	976,483	251,097	1,227,580	90.4

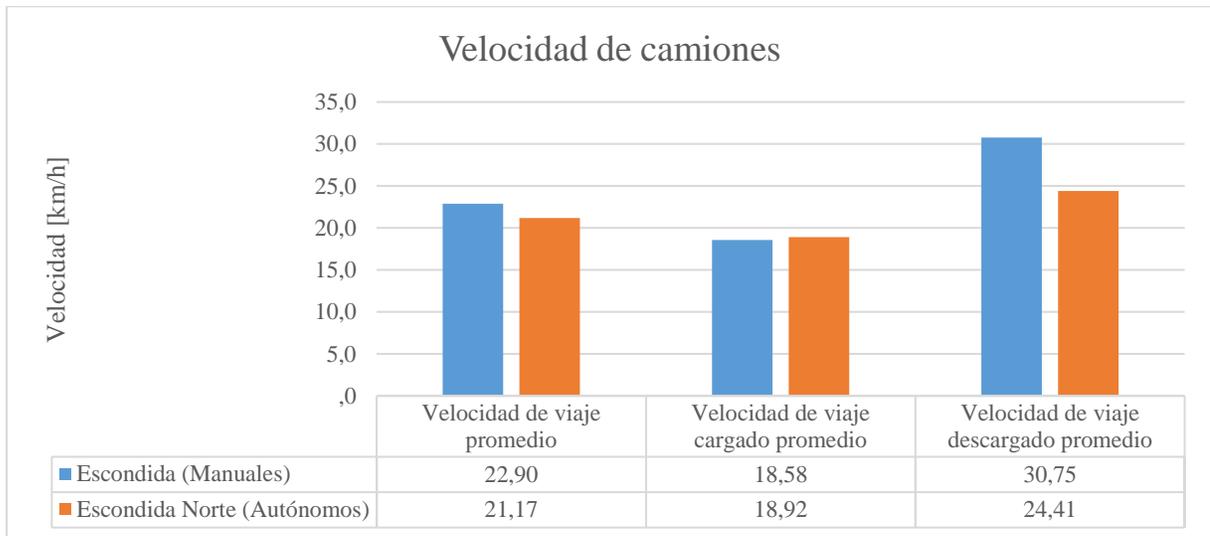
Como se puede apreciar de la tabla anterior, en el caso con igual número de camiones que el caso base, en el sistema con camiones manuales (Escondida) se alcanza el tonelaje del caso base, sin embargo, los camiones autónomos (Escondida Norte) quedan 15 mil toneladas bajo el objetivo.

**Tabla N° 5-21: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Simulación	Caso base	Igual N° camiones		1 camión menos en EN		2 camiones menos en EN	
	Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Número de camiones	139	117	22	117	21	117	20
Utilización [%]	83.2	81.9	90.0	81.9	91.0	81.6	92.4
Disponibilidad mecánica [%]	86.4	86.5	88.2	86.4	88.5	86.5	88.5
HO efectivas (sin colas) [h]	17.0	16.9	19.0	16.8	19.2	16.8	19.6
Tiempo promedio en cola [h]	0.8	1.1	0.5	1.0	0.5	1.1	0.5

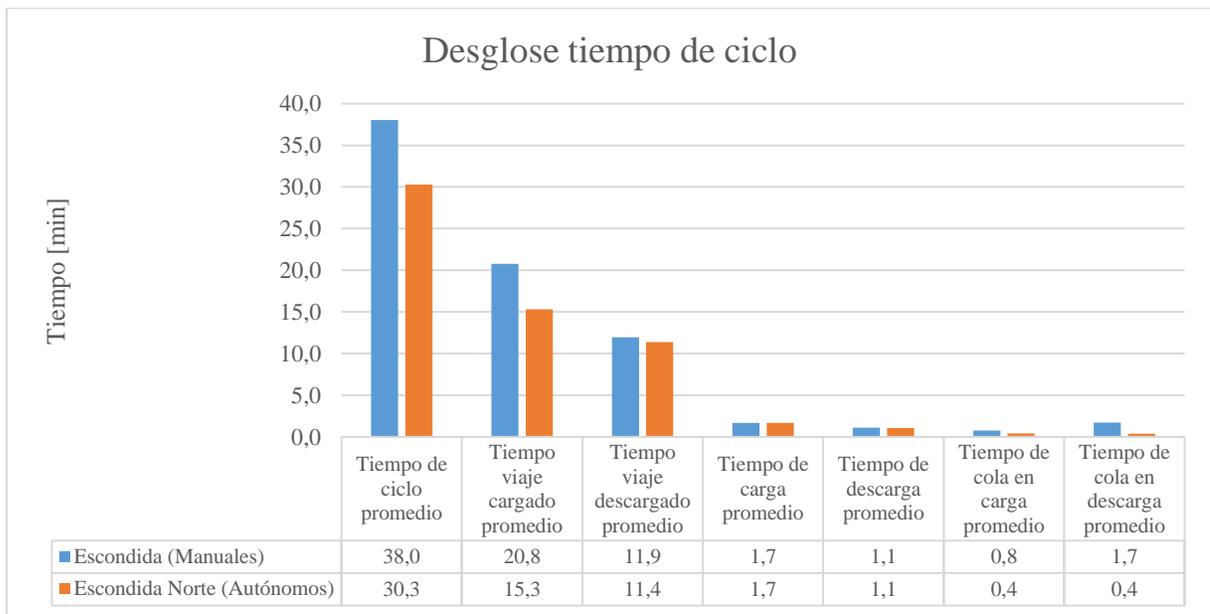
Similarmente al caso anterior, se pueden obtener las siguientes conclusiones a partir de la tabla anterior:

- ❖ Los camiones manuales disminuyen su utilización en comparación al caso base por una menor flexibilidad del sistema en cuanto a las asignaciones dinámicas y el aumento del tiempo de colas.
- ❖ Los camiones autónomos presentan una utilización mayor debido a menores detenciones programadas y tiempos de cola promedio menores (hasta un 7% mayor y 2 horas operativas efectivas adicionales que en el caso base).



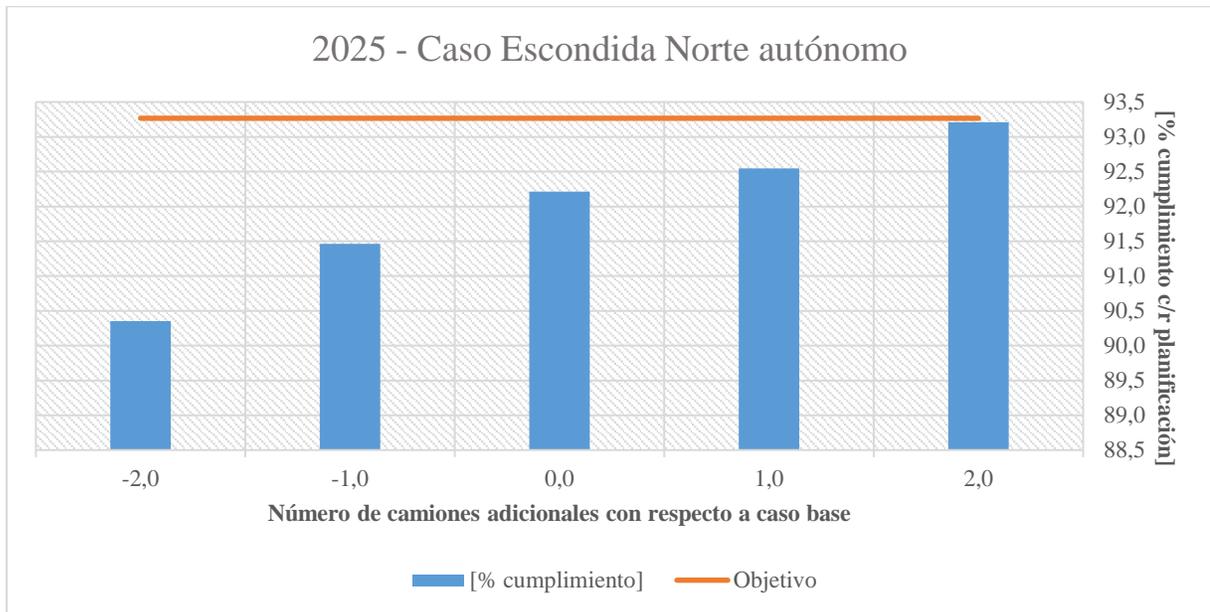
**Gráfico N° 5-34: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Los camiones manuales presentan en promedio una disminución de la velocidad promedio de 1.6 [km/h], dado por los perfiles de velocidad entregados.



**Gráfico N° 5-35: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Los camiones autónomos en Escondida Norte presentan un promedio de 2 minutos más en los tiempos de ciclo al compararlos con el caso base, lo cual se explica por la menor velocidad promedio de estos equipos y tiempos de acuatamiento en carga mayores.



**Gráfico N° 5-36: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

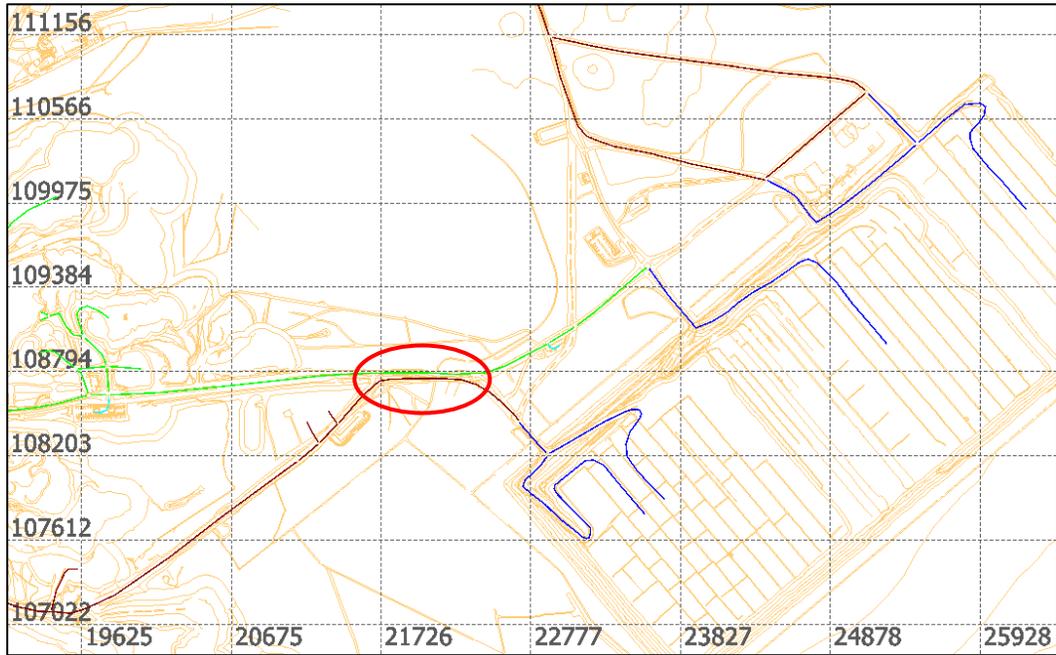
El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó dos camiones autónomo adicionales, dada por la diferencia de tonelaje transportado en Escondida Norte.

### 5.2.3 FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en las fases P11 y N18 de Escondida.

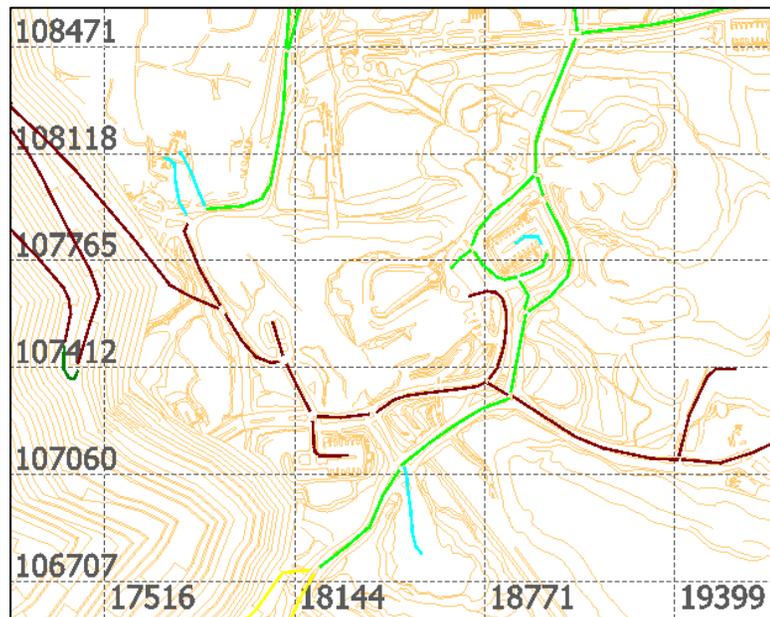
El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se considera establecer un estacionamiento de camiones autónomos de Escondida Norte en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena, localizado cerca del rajo Escondida.
- ❖ El mineral de Escondida que tenía como destino el chancador 5 se envía a los chancadores 2 y 3 (de manera proporcional a la capacidad de tratamiento de cada chancador).
- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existan 3 pisos de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de los dos sistemas autónomos y, por otro lado, el sistema manual.
- ❖ Se crean stocks para mineral que provenga de fases con flotas autónomas, de manera que no haya interferencias con las flotas manuales.
- ❖ Se requiere el realizar una segunda vía paralela a la que llega desde el rajo Escondida a las pilas de lixiviación para mantener la exclusividad de rutas de cada tecnología.



**Figura N° 5-5: Tres pisos en pilas de lixiviación dinámica, creación de stocks exclusivos y vía adicional requerida para mantener exclusividad de rutas por flota.**

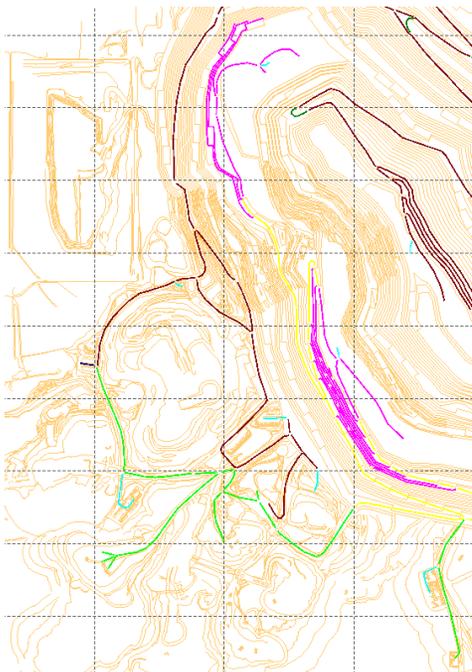
- ❖ Se restringe el uso de los chancadores 1 y 3 para las fases con tecnología autónoma y el chancador 2 para las fases con tecnología manual.
- ❖ Se tiene sólo una intersección entre rutas de caminos de flotas autónomas y manuales.
- ❖ Se crea una entrada exclusiva para camiones autónomos al *truck shop* principal.



**Figura N° 5-6: Exclusividad de uso de chancadores, intersección de rutas y entrada exclusiva a *truck shop* para cada flota de camiones.**

- ❖ Se restringe el uso de rampas para la fase N17 de manera que las rutas no se intercepten con las rutas de flotas autónomas.

- ❖ Se redirige el material que va a botaderos de la fase N17 que tienen entrada desde la zona autónoma hacia botaderos que tengan acceso desde zona manual (001\_3090\_cm1 a 001\_3110\_e).
- ❖ Se definen campañas de uso para el chancador 4 de manera que no existan ineficiencias al ser compartido por ambas flotas.



**Figura N° 5-7: Rutas desviadas de fase N17 para caso fases P11 y N18 autónomas, 2026.**

- ❖ Se tuvo en cuenta de mantener al menos dos estaciones de petróleo para cada sistema, y dos comedores y dos estacionamientos para el sistema que opera con una flota manual de camiones.

Inicialmente se consideran 164 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-22: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida N17&S4		Escondida P11&N18	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + P11&amp;N18 autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	20	65	45	34
1 camión menos en cada circuito	20	64	44	33
2 camiones menos en cada circuito	20	63	43	32

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-23: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Simulación	Producción Escondida N17&S4 [t]	Producción Escondida P11&N18 [t]	Producción Escondida Norte [t]	Total [t]	[% cumplimiento]
Caso base	597,717	364,037	378,342	1,340,096	96.2
<b>Caso Escondida Norte + P11&amp;N18 autónomo</b>					
Igual número de camiones que CB	577,463	367,003	348,659	1,293,125	92.8
1 camión menos en cada circuito	575,465	364,332	345,254	1,285,052	92.3
2 camiones menos en cada circuito	574,335	358,423	337,292	1,270,050	91.2

Se puede apreciar de la tabla anterior que, en el caso con igual número de camiones que el caso base:

- ❖ El sistema manual de Escondida se encuentra bajo el tonelaje producido diario del caso base por 20 mil toneladas. Esto se explica por la mayor distancia que deben recorrer los camiones cuando transportan material desde la fase N17 a la cual se le restringen las salidas.
- ❖ El sistema autónomo de Escondida alcanza el tonelaje objetivo.
- ❖ El sistema autónomo en Escondida Norte no logra el tonelaje del caso base por 30 mil toneladas.

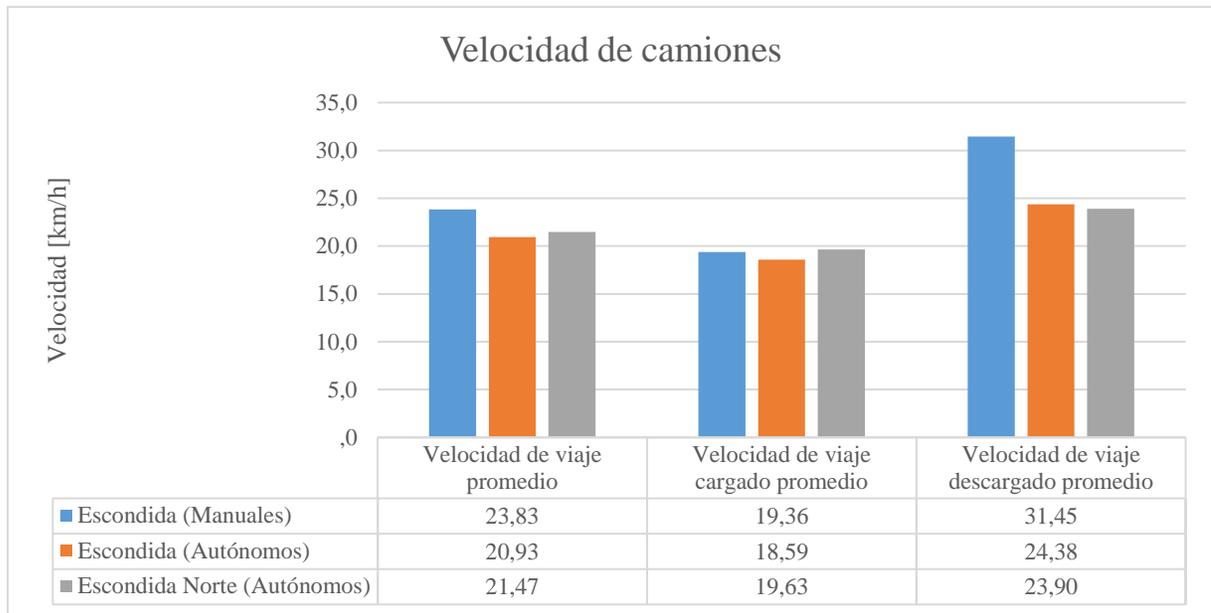
En total, el tonelaje total producido resulta bastante menor del obtenido del caso base, existiendo una baja de más del 3%. La disminución de cantidad de camiones no genera variaciones de tonelaje mayores a 8,000 toneladas en cada uno de los sistemas analizados.

**Tabla N° 5-24: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Caso Escondida Norte + P11&N18 autónomo	Caso base	Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito		
		Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Fases		N17&S4	P11&N18	EN	N17&S4	P11&N18	EN	N17&S4	P11&N18	EN
Número de camiones	164	85	45	34	84	44	33	83	43	32
Utilización [%]	82.1	82.2	85.7	87.6	82.6	87.1	89.0	83.4	88.4	89.9
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	85.8	88.5	88.3	86.1	88.5	88.5	86.1	88.1	88.5
HO efectivas (sin colas) [h]	16.4	16.7	18.2	18.4	16.8	18.5	18.8	17.0	18.5	19.0
Tiempo promedio en cola [h]	0.7	0.8	1.0	0.5	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0	0.6

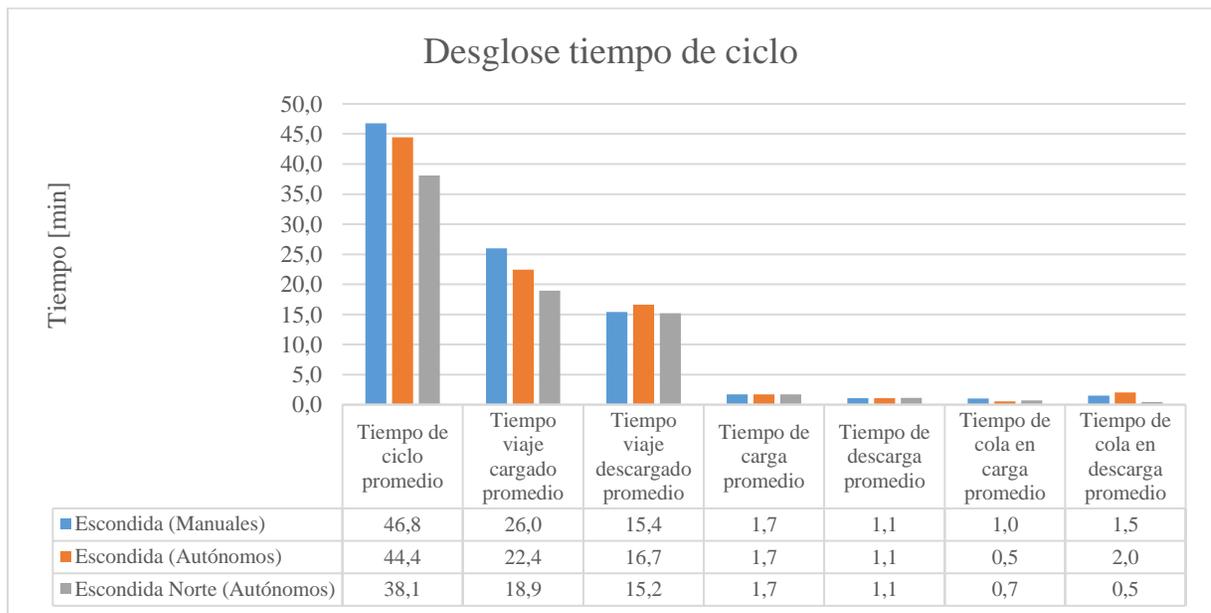
De la tabla anterior se puede notar que:

- ❖ Los sistemas más congestionados son los que presentan mayores tonelajes transportados.
- ❖ En este caso, los camiones manuales alcanzan niveles de utilización similares a los del caso base, sin embargo, no alcanzan el tonelaje del caso con sólo equipos manuales en la faena.
- ❖ Los dos sistemas de camiones autónomos presentan utilidades y horas operativas efectivas mayores, sin embargo, la brecha es menor que en los años anteriores analizados.



**Gráfico N° 5-37: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

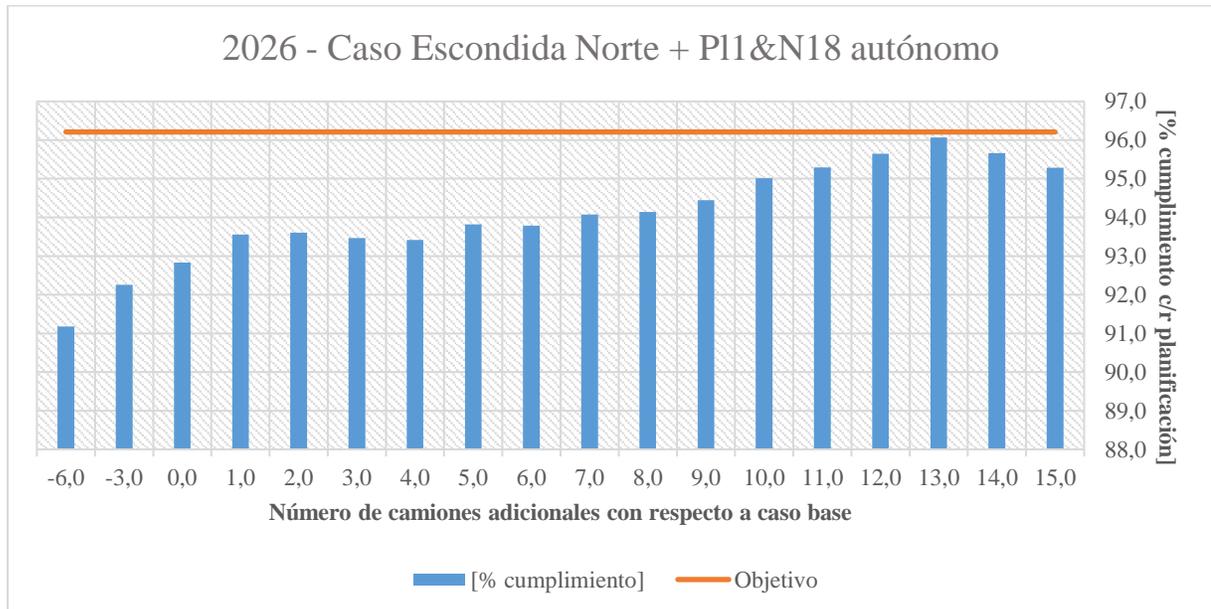
En general, los camiones autónomos presentan velocidades de viaje promedio menores a los manuales. En Escondida Norte los camiones autónomos conducen a velocidades un poco mayores que en las fases N18 y P11, lo cual se debe a la mayor profundidad de las últimas.



**Gráfico N° 5-38: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Al comparar los resultados del gráfico anterior con el caso base, se puede concluir que el dividir Escondida en 2 sistemas independientes genera que los tiempos de ciclo aumenten considerablemente (46.8 [min] para el sistema manual y 44.4 [min] para el sistema autónomo en comparación a los 36 [min] del caso base). Esto se debe a los desvíos que generan distancias

mayores a las del caso con sólo camiones manuales. En Escondida Norte, los tiempos de ciclo también aumentan, pero en menor medida, por las velocidades de camiones autónomos menores.



**Gráfico N° 5-39: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó que con 13 camiones se obtiene el mayor tonelaje transportado posible. Este caso presenta un cumplimiento del 95.7% del tonelaje planificado (vs el 96.2% del caso base).

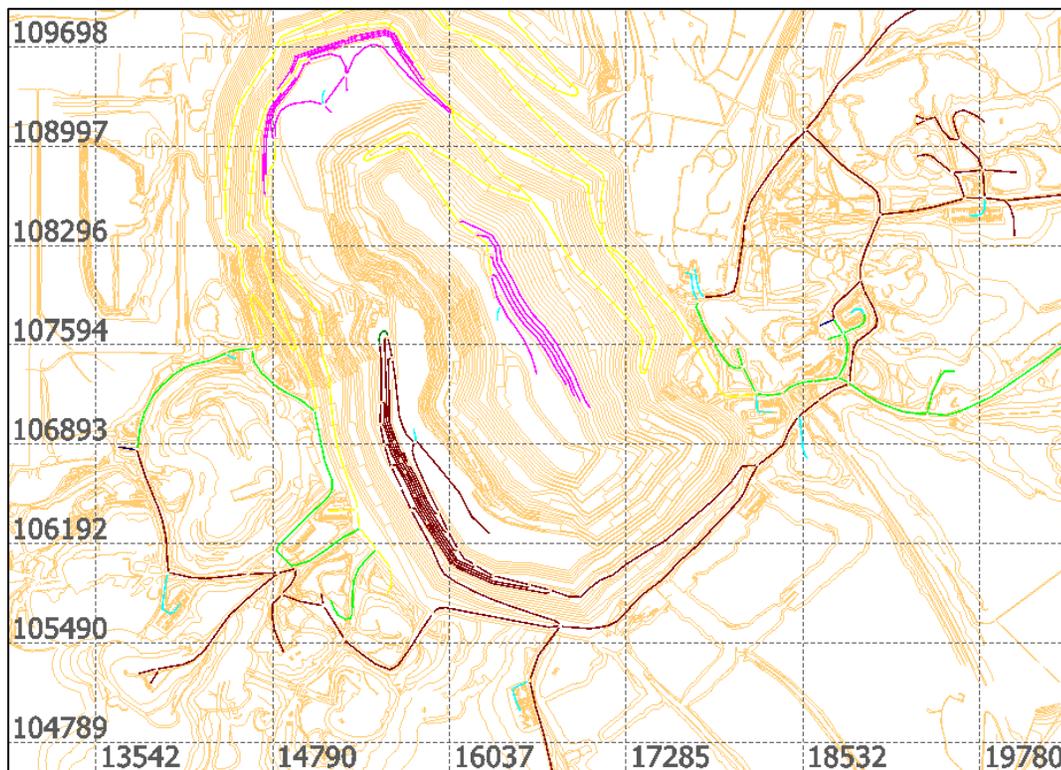
#### 5.2.4 FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en la fase S4 de Escondida. A pesar de que la fase N17 comparte muchos caminos con la fase S4, no se consideró traspasarlas juntas a un sistema autónomo porque la cantidad de equipos a adquirir hubiese sobrepasado límites de criterios definidos por Minera Escondida (50 equipos adicionales de un año a otro).

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se considera establecer un estacionamiento de camiones autónomos de Escondida Norte en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena, localizado cerca del rajo Escondida.
- ❖ El mineral de Escondida que tenía como destino el chancador 5 se envía a los chancadores 2 y 3 (de manera proporcional a la capacidad de tratamiento de cada chancador).
- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existan 3 pisos de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de los dos sistemas autónomos y, por otro lado, el sistema manual.

- ❖ Se crean stocks para mineral que provenga de fases con flotas autónomas, de manera que no haya interferencias con las flotas manuales.
- ❖ Se requiere el realizar una segunda vía paralela a la que llega desde el rajo Escondida a las pilas de lixiviación para mantener la exclusividad de rutas de cada tecnología.
- ❖ Se restringe el uso de los chancadores 1 y 3 para las fases con tecnología manual y el chancador 2 debe operar con campañas de uso entre tecnologías (se definen tiempos de uso).
- ❖ Se tiene sólo una intersección entre rutas de caminos de flotas autónomas y manuales.
- ❖ Se crea una entrada exclusiva para camiones autónomos al *truck shop* principal.
- ❖ Se restringe el uso de rampas para la fase N17 de manera que las rutas no se intercepten con las rutas de flotas autónomas.
- ❖ Se redirige el material que va a botaderos de la fase N17 que tienen entrada desde la zona autónoma hacia botaderos que tengan acceso desde zona manual (001\_3110\_e a 001\_3090\_cm1).
- ❖ Se definen campañas de uso para el chancador 4 de manera que no existan ineficiencias al ser compartido por ambas flotas.



**Figura N° 5-8: Rutas desviadas de fase N17 para caso fases S4 autónoma, 2026.**

Inicialmente se consideran 164 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-25: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida N17&P11&N18	Escondida S4	Escondida Norte	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + S4 autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	21	60	49	34
1 camión menos en cada circuito	21	59	48	33
2 camiones menos en cada circuito	21	58	47	32

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenciones planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-26: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, 2026.**

Simulación	Producción Escondida N17&P11&N18	Producción Escondida S4	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
Caso base	538,202	423,552	378,342	1,340,096	96.2
<b>Caso Escondida Norte + S4 autónomo</b>					
Igual número de camiones que CB	541,938	401,277	349,667	1,292,882	92.8
1 camión menos en cada circuito	541,314	400,246	345,953	1,287,513	92.4
2 camiones menos en cada circuito	543,608	391,343	345,164	1,280,115	91.9

Se puede apreciar de la tabla anterior que, en el caso con igual número de camiones que el caso base:

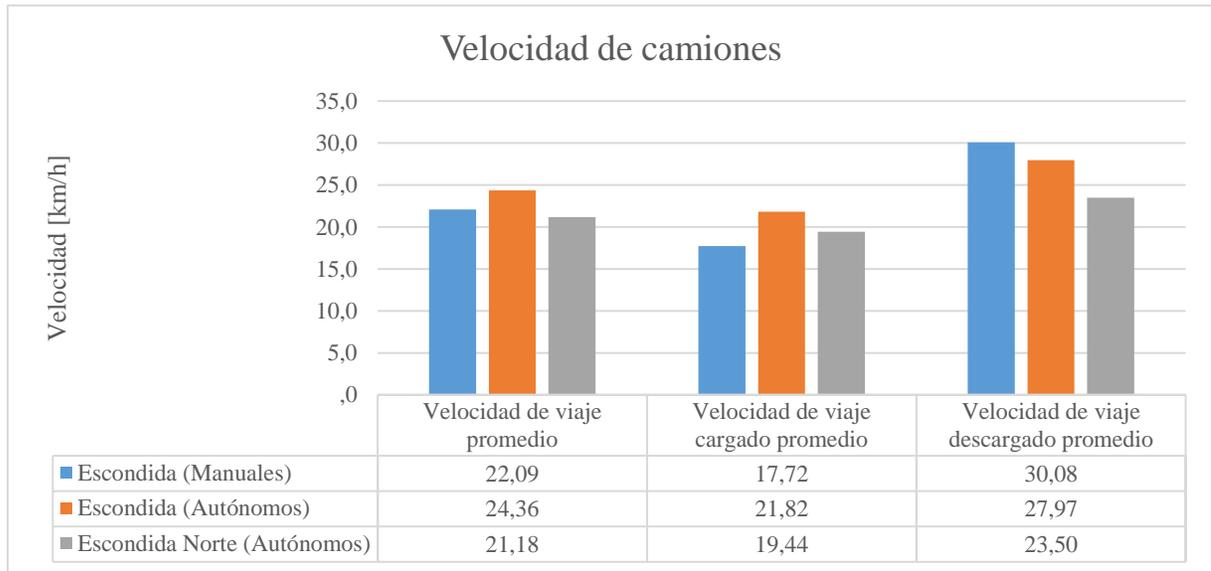
- ❖ El sistema manual de Escondida alcanza y sobrepasa el mineral producido diario en el caso base. Esto se explica por la menor distancia que deben recorrer los camiones cuando transportan material desde la fase N17, cuyo material es redirigido a locaciones más cercanas.
- ❖ Ambos sistemas autónomos, con la cantidad de camiones definidos se encuentran por debajo del tonelaje objetivo

El porcentaje de cumplimiento del material producido es similar al del otro caso con proyecto analizado para el año 2026.

**Tabla N° 5-27: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

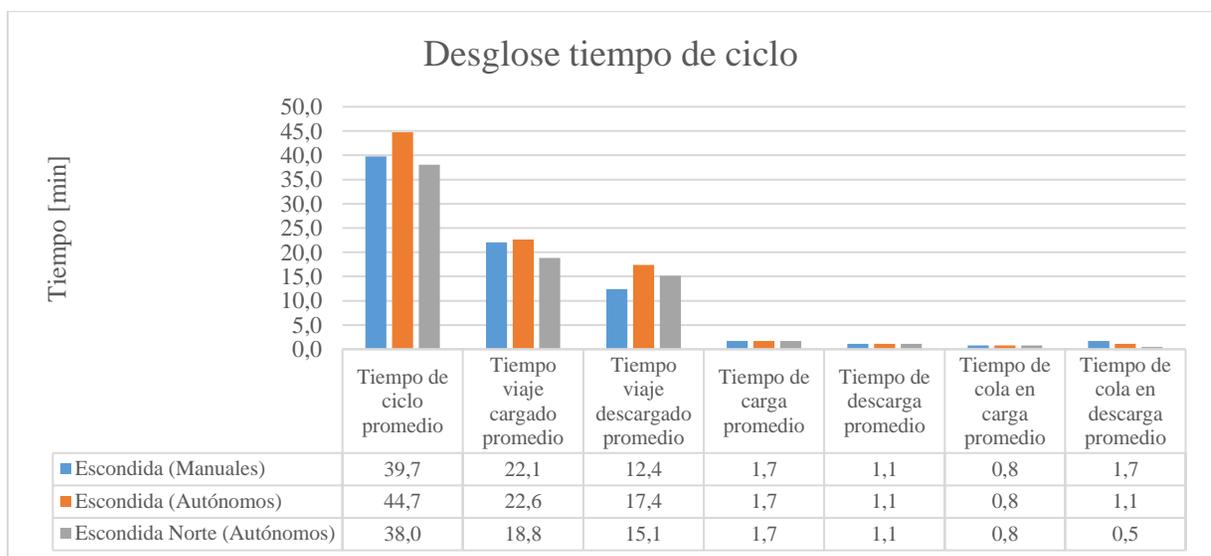
Caso Escondida Norte + S4 autónomo	Caso base	Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito		
		Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Fases		N17&P11 &N18	S4	EN	N17&P11 &N18	S4	EN	N17&P11 &N18	S4	EN
Número de camiones	164	81	49	34	80	48	33	79	47	32
Utilización [%]	82.1	72.9	83.5	88.0	73.3	85.1	89.3	73.8	85.1	91.6
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	85.8	88.5	88.1	86.5	88.5	87.7	86.7	88.9	88.3
HO efectivas (sin colas) [h]	16.4	14.6	17.6	18.5	14.9	17.9	18.6	15.0	17.9	19.3
Tiempo promedio en cola [h]	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	0.7	0.6	0.9	0.7	0.6

En general se tienen utilidades bajas de los equipos al compararlas con el caso anterior (P11 y N18 autónomas) en Escondida, tanto para el sistema manual como autónomo. En Escondida Norte no existe una gran variación pues las consideraciones son las mismas que en el caso anterior. Se debe notar que a pesar de que las utilidades son bajas, no se alcanzan los tonelajes planificados para Escondida, lo cual puede deberse a que se llega al punto de saturación del sistema dados las restricciones ingresadas.



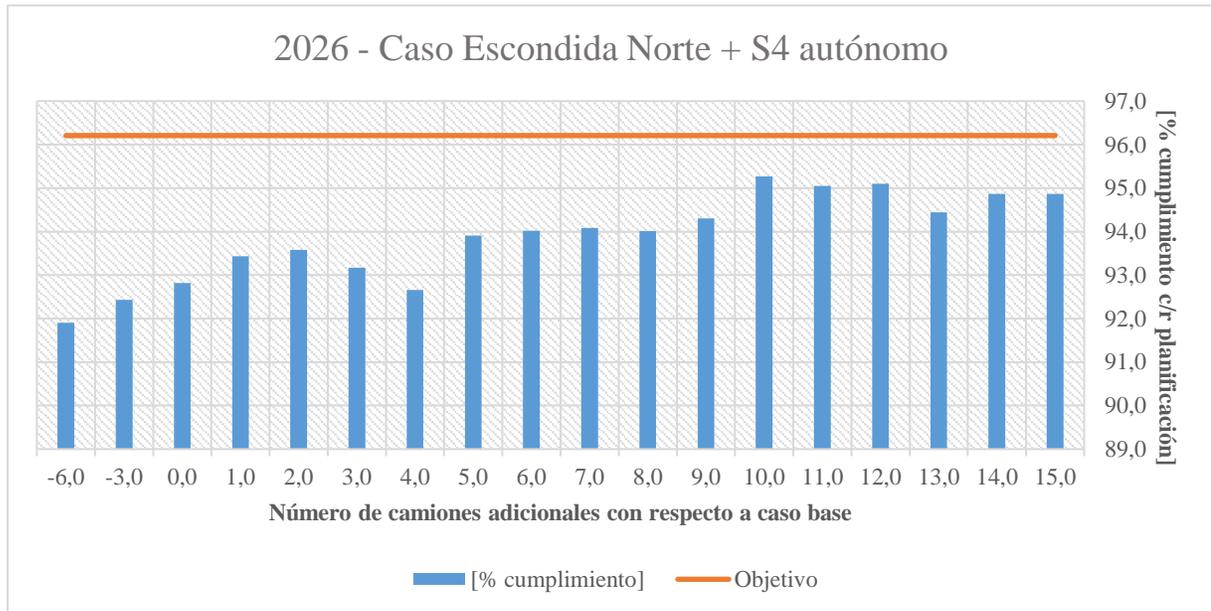
**Gráfico N° 5-40: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

En este caso, los camiones autónomos para el sistema independiente de Escondida alcanzan mayores velocidades promedio que los manuales. Esto se debe a la profundidad de la fase P11 que genera que los camiones asignados a esta ocupen gran cantidad de su tiempo en viajes en pendiente y por otro lado a que las rutas de la fase S4 para llegar a destinos, a pesar de ser más largas, son más horizontales.



**Gráfico N° 5-41: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Nuevamente, globalmente se aumentan los tiempos de ciclo al integrar la tecnología autónoma. Se puede reforzar la idea de que existen mayores desvíos que generan rutas más largas para el sistema S4 (el cual aumenta casi 7 minutos el tiempo promedio en comparación con el caso base), esto también explica el menor cumplimiento de esta fase. Las fases que operan con camiones manuales también aumentan sus tiempos de ciclo en comparación al caso base (en promedio en 1 minuto).



**Gráfico N° 5-42: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó que nunca se alcanza el tonelaje objetivo.

### 5.2.5 FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en las fases P11, P11s y N18 de Escondida.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se crean stocks intermedios, cercanos al rajo Escondida Norte, para mineral que se envía al chancador 4 (mineral oxidado). El plan considera que la flota de camiones autónomos deposita este mineral en estos destinos (dividido en mineral con y sin presencia de arcilla) y luego es remanejado de manera que la flota manual lo lleve a su destino.

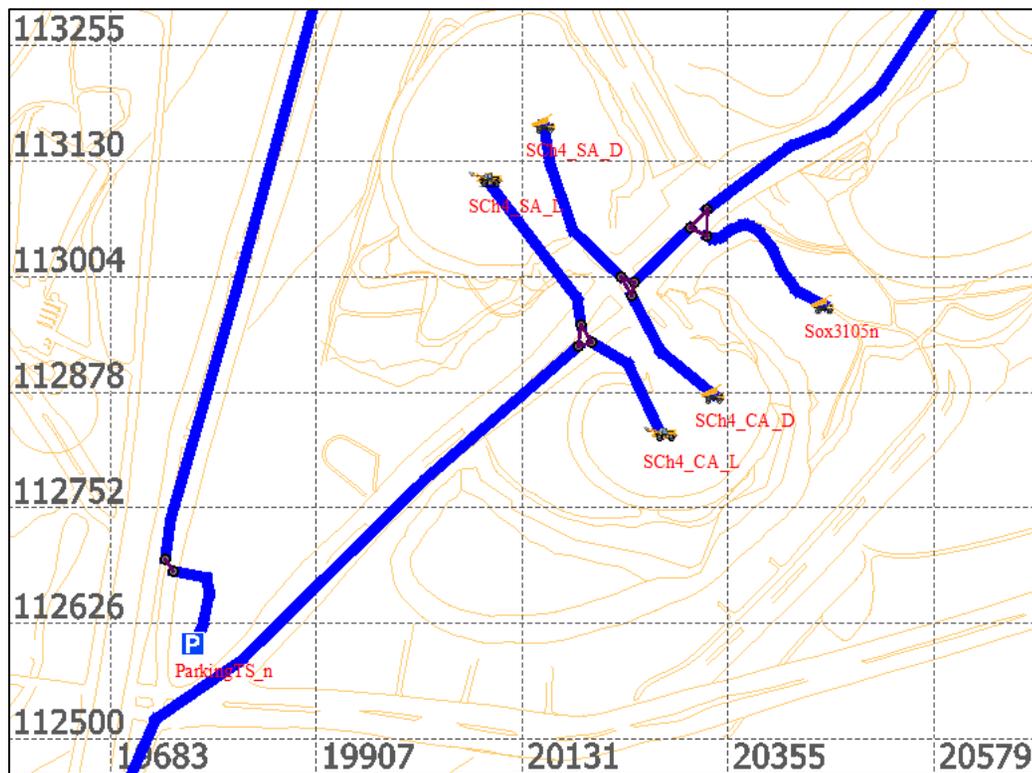
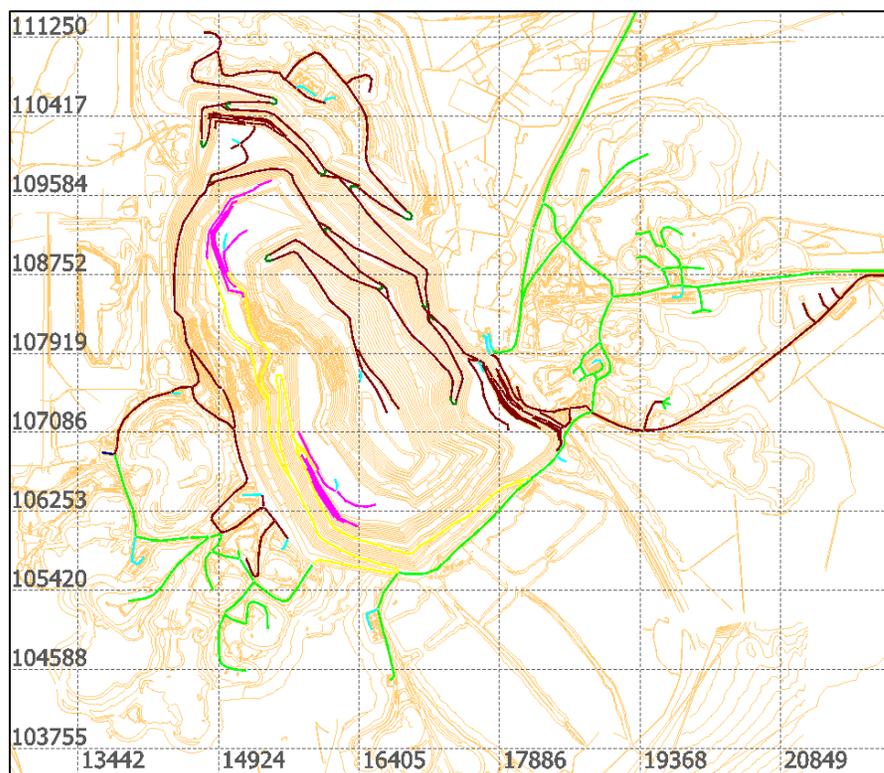


Figura N° 5-9: Stocks intermedios de mineral de cobre oxidado con y sin arcilla, 2027.

- ❖ Se considera establecer un estacionamiento de camiones autónomos de Escondida Norte en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena, localizado cerca del rajo Escondida.
- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existan 3 pisos de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de los dos sistemas autónomos y, por otro lado, el sistema manual.
- ❖ Se crean stocks para mineral que provenga de fases con flotas autónomas, de manera que no haya interferencias con las flotas manuales.
- ❖ Se requiere el realizar una segunda vía paralela a la que llega desde el rajo Escondida a las pilas de lixiviación para mantener la exclusividad de rutas de cada tecnología.
- ❖ Se restringe el uso del chancador 1 para las fases con tecnología autónoma y los chancadores 2 y 3 para fases con tecnología manual.
- ❖ Se tiene sólo una intersección entre rutas de caminos de flotas autónomas y manuales.
- ❖ Se crea una entrada exclusiva para camiones autónomos al *truck shop* principal.
- ❖ Se crea una nueva entrada al botadero 001\_3090\_cm1 para que cada flota pueda acceder al mismo independientemente.
- ❖ Se definen campañas de uso para el chancador 4 de manera que no existan ineficiencias al ser compartido por ambas flotas.



**Figura N° 5-10: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida, en caso P11, P11s y N18 autónomas, 2027.**

Inicialmente se consideran 155 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

**Tabla N° 5-28: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida N17&S4		Escondida P11&P11s&N18	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + P11&amp;P11s&amp;N18 autónomo</b>				
<b>Igual número de camiones que CB</b>	20	53	30	52
<b>1 camión menos en cada circuito</b>	20	52	29	51
<b>2 camiones menos en cada circuito</b>	20	51	28	50

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-29: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Simulación	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida P11&P11s&N18	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
<b>Caso base</b>	511,544	345,296	458,089	1,314,928	96.3
<b>Caso Escondida Norte + P11&amp;P11s&amp;N18 autónomo</b>					
<b>Igual número de camiones que CB</b>	478,361	354,358	459,504	1,292,224	94.6
<b>1 camión menos en cada circuito</b>	474,450	350,380	456,078	1,280,907	93.8
<b>2 camiones menos en cada circuito</b>	468,795	346,736	451,988	1,267,520	92.8

Se puede apreciar de la tabla anterior que, en el caso con igual número de camiones que el caso base:

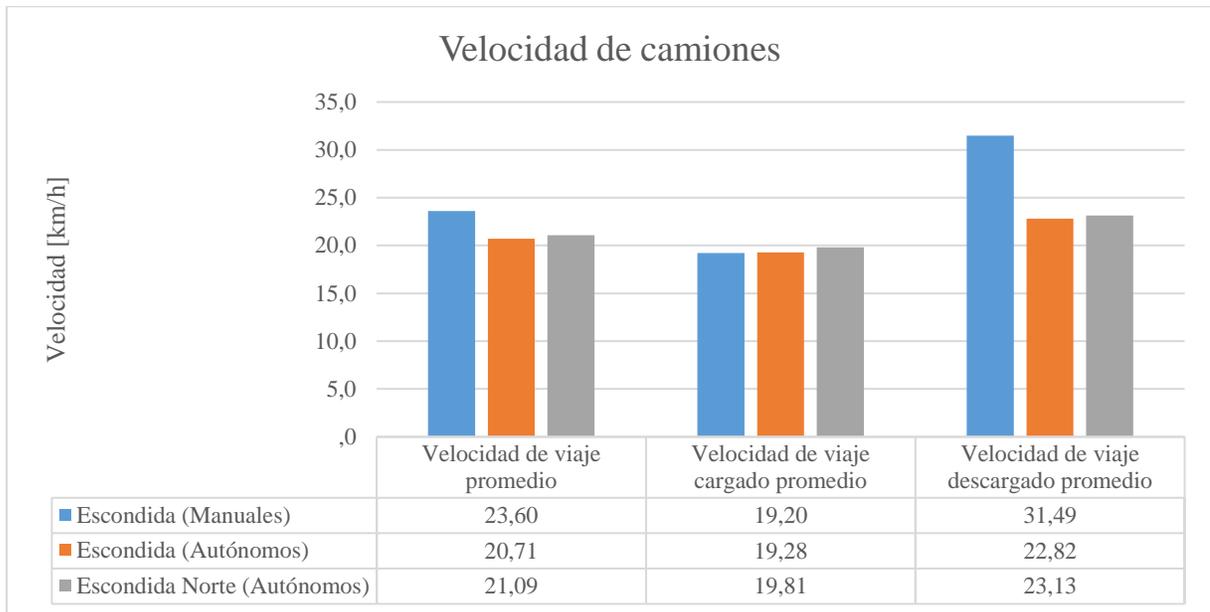
- ❖ El sistema manual de Escondida se encuentra bajo el tonelaje producido del caso base por 30 mil toneladas. Esto se explica por la mayor distancia que deben recorrer los camiones cuando transportan material da botadero desde las fases N17 y S4 a la nueva entrada al botadero 001\_3090\_cm1.
- ❖ El sistema autónomo de Escondida alcanza el tonelaje objetivo y lo sobrepasa por 10 mil toneladas.
- ❖ El sistema autónomo en Escondida Norte alcanza el tonelaje objetivo.

En total, el tonelaje total producido resulta menor del obtenido del caso base, existiendo una baja de menor al 2%.

**Tabla N° 5-30: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

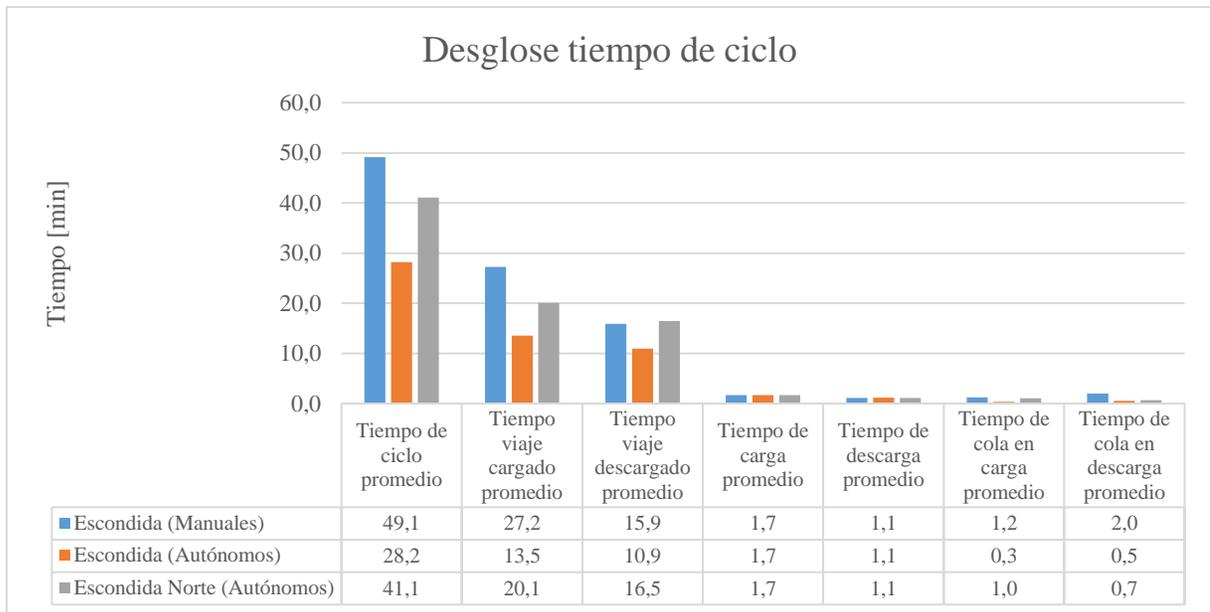
Caso Escondida Norte + P11&P11s&N18 autónomo	Caso base		Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito		2 camiones menos en circuito		
	Manuales	Manuales	Autónomos	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos		
<b>Fases</b>		N17 & S4	P11&P11s & N18	EN	N17 & S4	P11&P11s & N18	EN	N17 & S4	P11&P11s & N18	EN
<b>Número de camiones</b>	155	73	30	52	72	29	51	71	28	50
<b>Utilización [%]</b>	82.9	81.9	82.8	84.3	81.6	82.0	85.3	82.1	85.2	86.5
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.2	86.4	88.5	88.5	86.5	88.4	88.3	86.4	87.9	88.1
<b>HO efectivas (sin colas) [h]</b>	16.9	16.7	17.3	17.7	16.9	17.5	17.9	16.9	17.7	18.1
<b>Tiempo promedio en cola [h]</b>	0.8	0.9	0.6	0.7	0.9	0.6	0.7	0.9	0.5	0.7

A pesar de que el sistema manual es el más saturado y presenta una utilización alta, es el que presenta una mayor diferencia con el caso base. En este caso, la utilización de los equipos autónomos no difiere en gran medida de los equipos manuales en Escondida que es donde se obtienen tonelajes sobre el objetivo. Contrario a los resultados en casos anteriores, menor congestión genera una mayor producción.



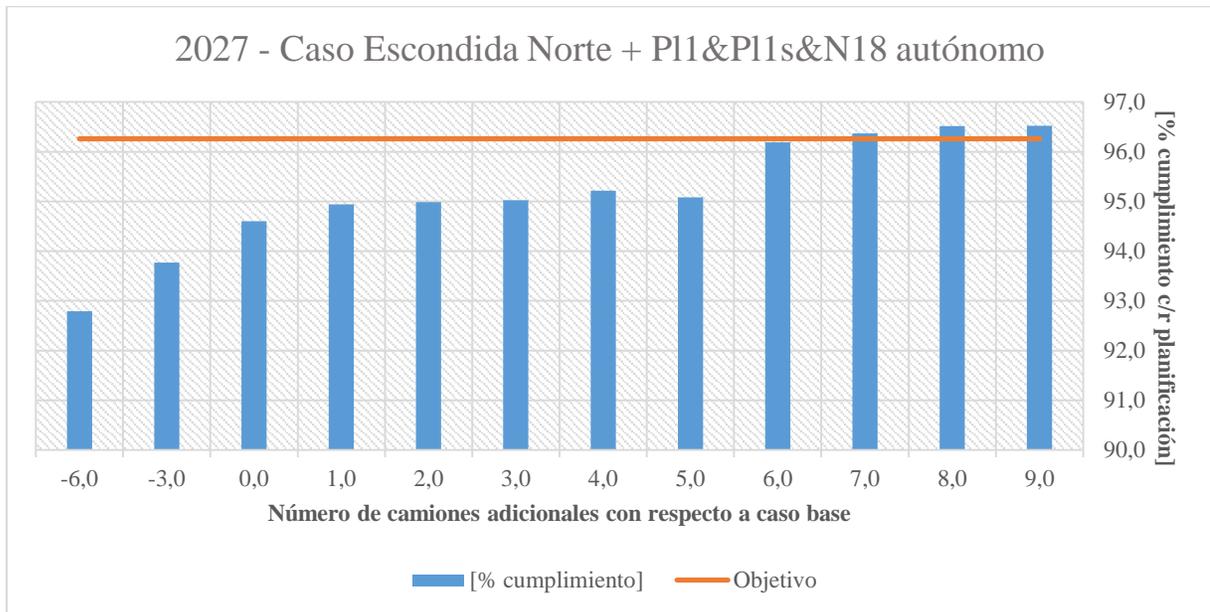
**Gráfico N° 5-43: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Los camiones autónomos presentan velocidades promedio menores a los autónomos y en Escondida y Escondida Norte presentan estadísticas similares.



**Gráfico N° 5-44: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

La entrada de la fase P11s, como implica en primer lugar realizar el *stripping*, disminuye los tiempos de ciclo de la flota autónoma que trabaja en este sistema.



**Gráfico N° 5-45: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó 6 camiones adicionales.

### 5.2.6 FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en las fases S4 y N17 de Escondida. Este caso es el caso contrario al anteriormente presentado.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las mismas modificaciones que en el caso con las fases P11, P11s y N18 autónomas pero invertido para los sistemas que trabajan en el rajo Escondida.

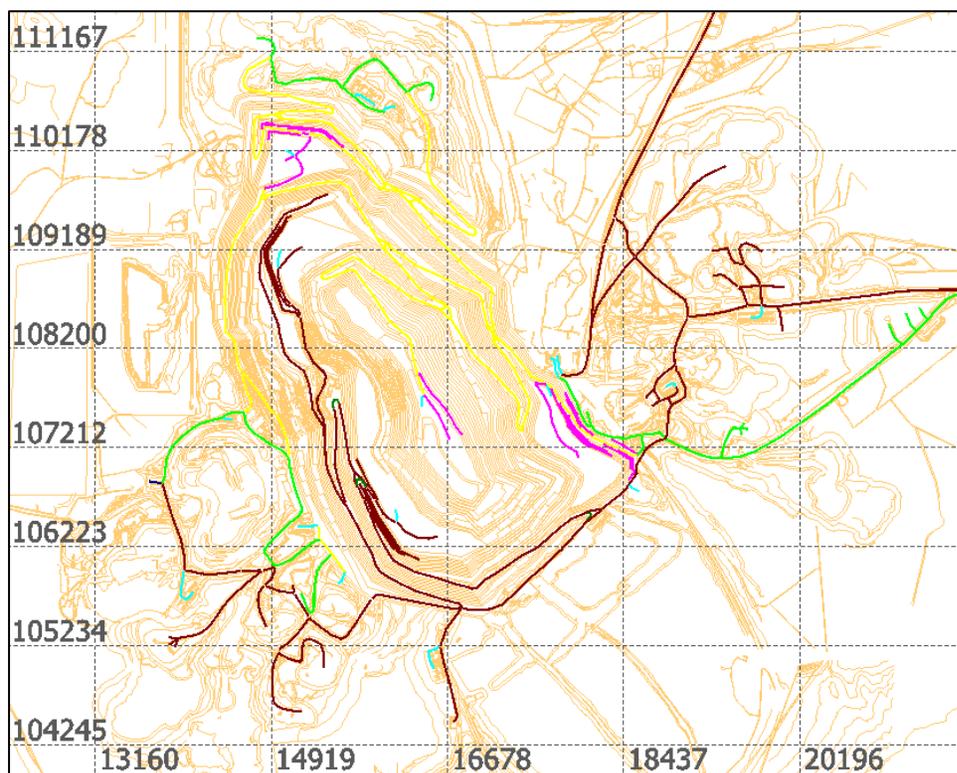


Figura N° 5-11: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida, en caso N17, y S4 autónomas, 2027.

Inicialmente se consideran 155 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

Tabla N° 5-31: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida P11&P11s&N18		Escondida N17&S4	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + N17&amp;S4 autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	8	22	73	52
1 camión menos en cada circuito	8	21	72	51
2 camiones menos en cada circuito	8	20	71	50

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-32: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

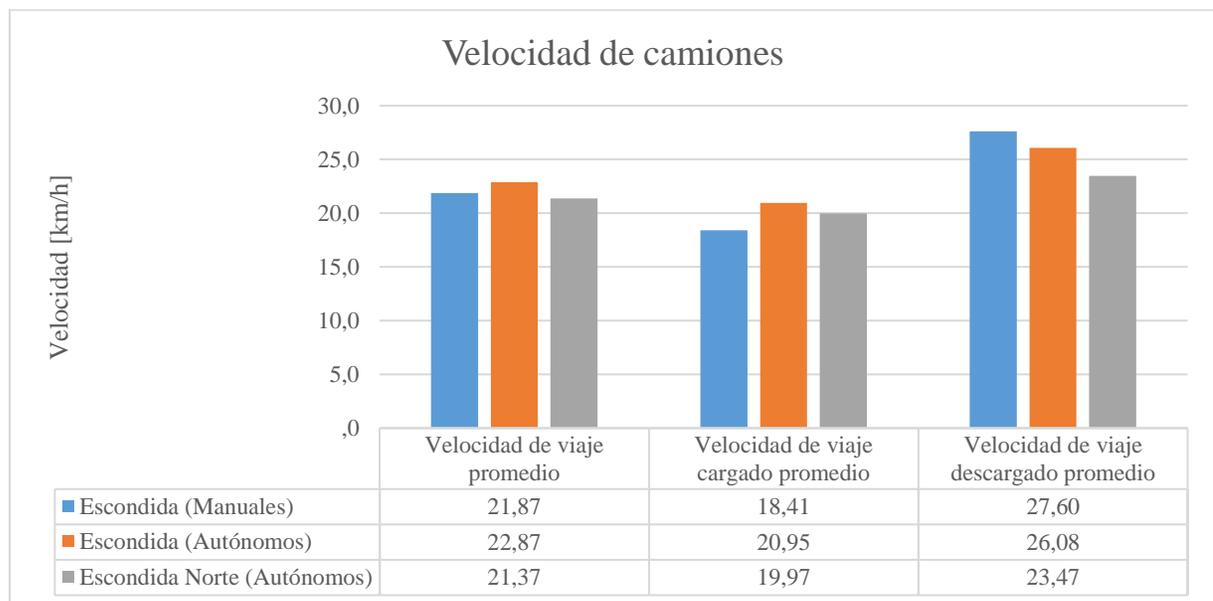
Simulación	Producción Escondida P11&P11s&N18	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
Caso base	345,296	511,544	458,089	1,314,928	96.3
<b>Caso Escondida Norte + N17&amp;S4 autónomo</b>					
Igual número de camiones que CB	346,807	499,745	457,180	1,303,732	95.4
1 camión menos en cada circuito	339,772	496,319	450,402	1,286,494	94.2
2 camiones menos en cada circuito	338,852	494,771	449,139	1,282,762	93.9

En este caso, el único sistema que no alcanza el tonelaje del caso base es el sistema autónomo en Escondida con una falta de 10 mil toneladas a transportar. Esta configuración resulta alcanzar un porcentaje de cumplimiento bastante mayor que en el caso anterior (P11, P11s y N18 autónomas), existiendo una diferencia global de un 1% con respecto al caso base.

**Tabla N° 5-33: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

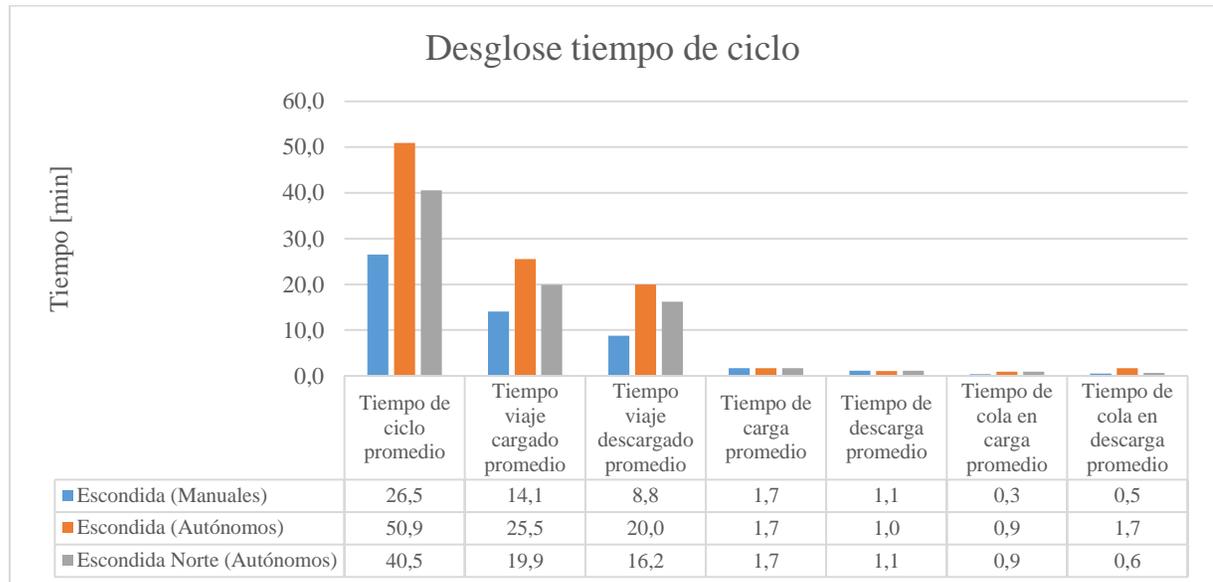
Caso Escondida Norte + N17&S4 autónomo	Caso base	Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito		
		Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Fases		P11&P11s &N18	N17 &S4	EN	P11&P11s &N18	N17 &S4	EN	P11&P11s &N18	N17 &S4	EN
Número de camiones	155	30	73	52	29	72	51	28	71	50
Utilización [%]	82.9	81.7	82.9	83.1	81.7	82.7	83.6	81.9	83.6	84.7
Disponibilidad mecánica [%]	86.2	86.2	88.5	88.3	86.5	88.5	88.2	86.4	88.5	88.5
HO efectivas (sin colas) [h]	16.9	16.6	17.3	17.4	16.7	17.5	17.5	17.1	17.6	17.8
Tiempo promedio en cola [h]	0.8	0.6	0.8	0.6	0.6	0.9	0.6	0.6	0.8	0.6

Las utilidades de los camiones autónomos en este caso tampoco presentan diferencias importantes con las flotas manuales.



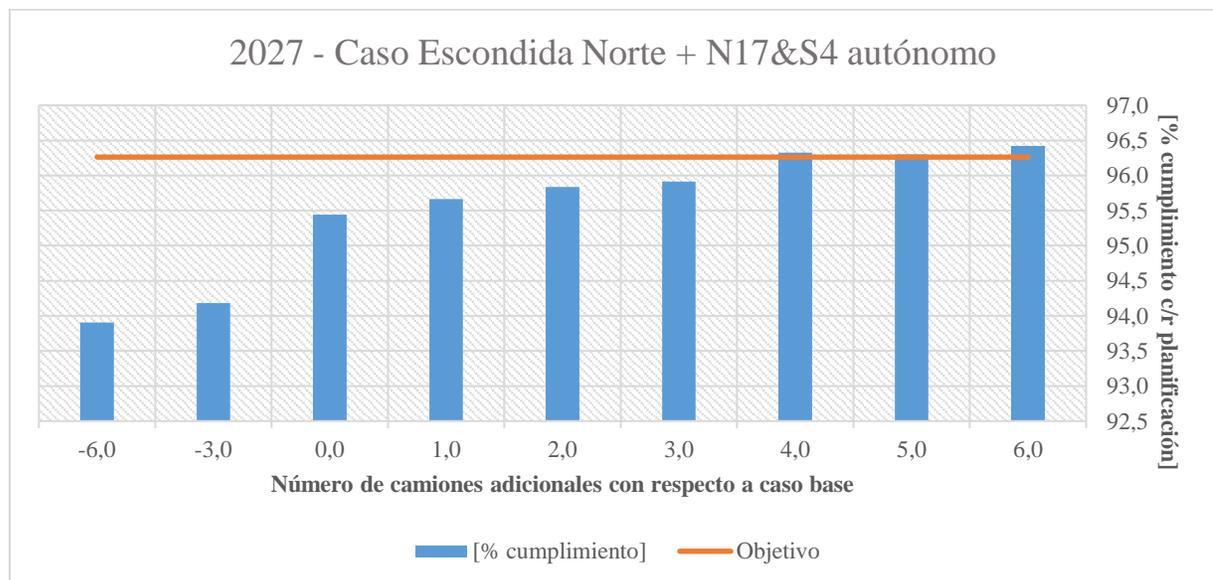
**Gráfico N° 5-46: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Considerando que aún se explotan los últimos bancos de la fase P11, se comprende que las velocidades promedio de los camiones manuales sean similares a las de flotas autónomas, a pesar de la diferencia entre perfiles, dado por el mayor tiempo de viaje en pendientes.



**Gráfico N° 5-47: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

La fase P11s, por recién comenzar a explotarse y ser muy superficial, genera que los tiempos promedio de ciclo disminuyan considerablemente en las flotas de camiones manuales. Se presenta el resultado inverso del caso previo que consideraba un sistema autónomo para las fases P11, P11s y N18.



**Gráfico N° 5-48: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó cuatro camiones autónomo adicionales. Comparado con el caso anterior, son 2 camiones menos que debieran considerarse.

### **5.2.7 FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma**

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en las fases P11s y N18 de Escondida.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las siguientes modificaciones:

- ❖ Se crean stocks intermedios, cercanos al rajo Escondida Norte, para mineral que se envía al chancador 4 (mineral oxidado). El plan considera que la flota de camiones autónomos deposita este mineral en estos destinos (dividido en mineral con y sin presencia de arcilla) y luego es remanejado de manera que la flota manual lo lleve a su destino.
- ❖ Se considera establecer un estacionamiento de camiones autónomos de Escondida Norte en donde un operador toma el control del equipo y lo conduce hasta el *Truck Shop* principal y único de la faena, localizado cerca del rajo Escondida.
- ❖ En las pilas estáticas de lixiviación, se considera que existan 3 pisos de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de los dos sistemas autónomos y, por otro lado, el sistema manual.
- ❖ Se crean stocks para mineral que provenga de fases con flotas autónomas, de manera que no haya interferencias con las flotas manuales.
- ❖ Se requiere el realizar una segunda vía paralela a la que llega desde el rajo Escondida a las pilas de lixiviación para mantener la exclusividad de rutas de cada tecnología.
- ❖ Se restringe el uso del chancador 1 para las fases con tecnología autónoma, el chancador 3 exclusivo para flotas manuales y el chancador 2 se comparte con campañas de uso (se definen tiempos de uso).
- ❖ Se tiene sólo una intersección entre rutas de caminos de flotas autónomas y manuales.
- ❖ Se crea una entrada exclusiva para camiones autónomos al *truck shop* principal.
- ❖ Se crea una nueva entrada al botadero 001\_3090\_cm1 para que cada flota pueda acceder al mismo independientemente.
- ❖ Se definen campañas de uso para el chancador 4 de manera que no existan ineficiencias al ser compartido por ambas flotas.

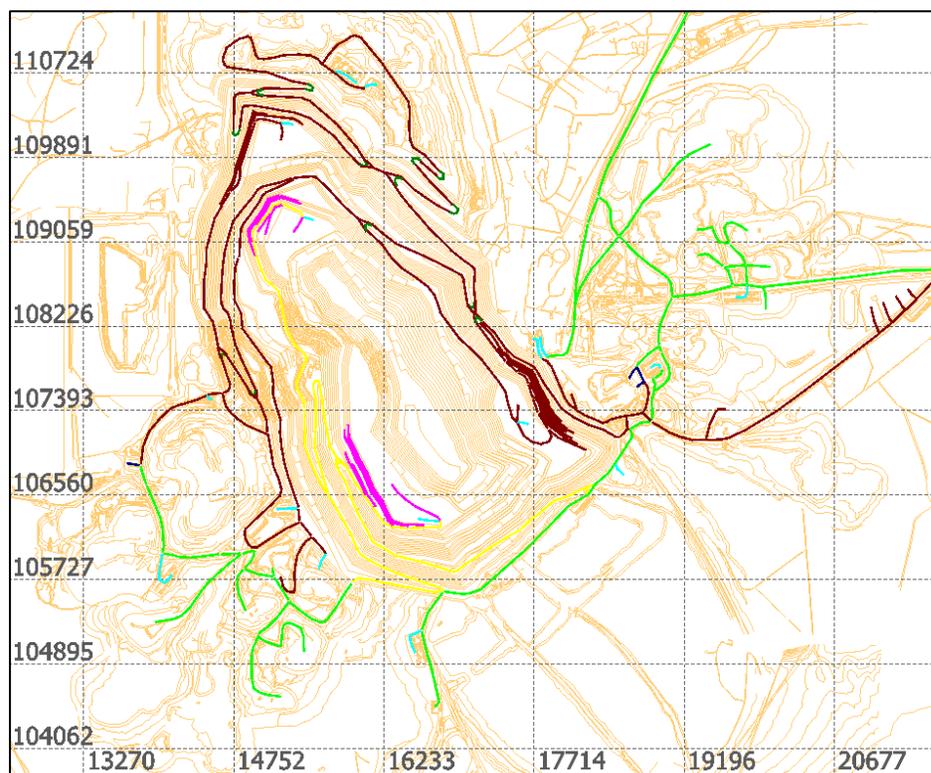


Figura N° 5-12: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso P11s y N18 autónomas, 2027.

Inicialmente se consideran 161 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

Tabla N° 5-34: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida N17&S4		Escondida P11s&N18	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + P11s&amp;N18 autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	20	53	42	46
1 camión menos en cada circuito	20	52	41	45
2 camiones menos en cada circuito	20	51	40	44

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-35: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.**

	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida P11s&N18	Producción Escondida Norte	Total	
Simulación	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
Caso base	487,603	353,047	457,761	1,298,410	95.2
<b>Caso Escondida Norte + P11s&amp;N18 autónomo</b>					
Igual número de camiones que CB	464,888	355,083	472,987	1,292,958	94.8
1 camión menos en cada circuito	464,844	357,750	468,251	1,290,845	94.7
2 camiones menos en cada circuito	465,561	354,818	467,962	1,288,341	94.5

Se puede apreciar de la tabla anterior que, en el caso con igual número de camiones que el caso base:

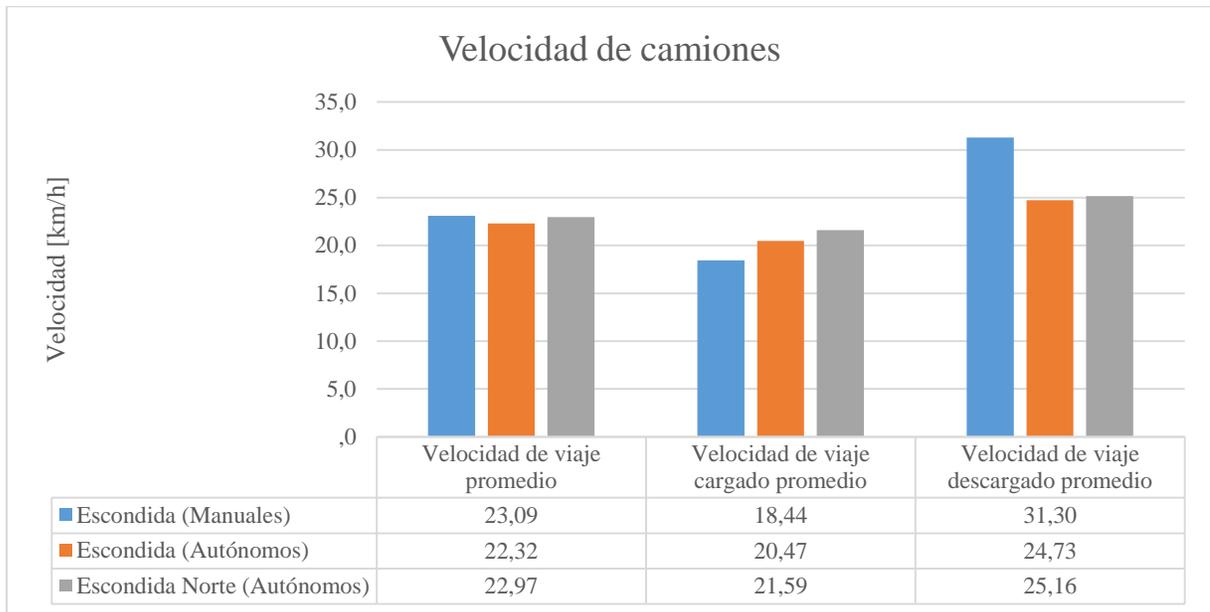
- ❖ El sistema manual de Escondida se encuentra bajo el tonelaje producido diario del caso base por 20 mil toneladas. Esto se explica por la mayor distancia que deben recorrer los camiones cuando transportan material da botadero desde las fases N17 y S4 a la nueva entrada al botadero 001\_3090\_cm1.
- ❖ El sistema autónomo de Escondida alcanza el tonelaje objetivo.
- ❖ El sistema autónomo en Escondida Norte alcanza el tonelaje objetivo y lo sobrepasa por 15 mil toneladas.

Globalmente, se alcanza un cumplimiento de 94.8%, siendo este el año en que la implementación de los dos sistemas autónomos en Escondida presenta los mejores resultados.

**Tabla N° 5-36: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, 2028.**

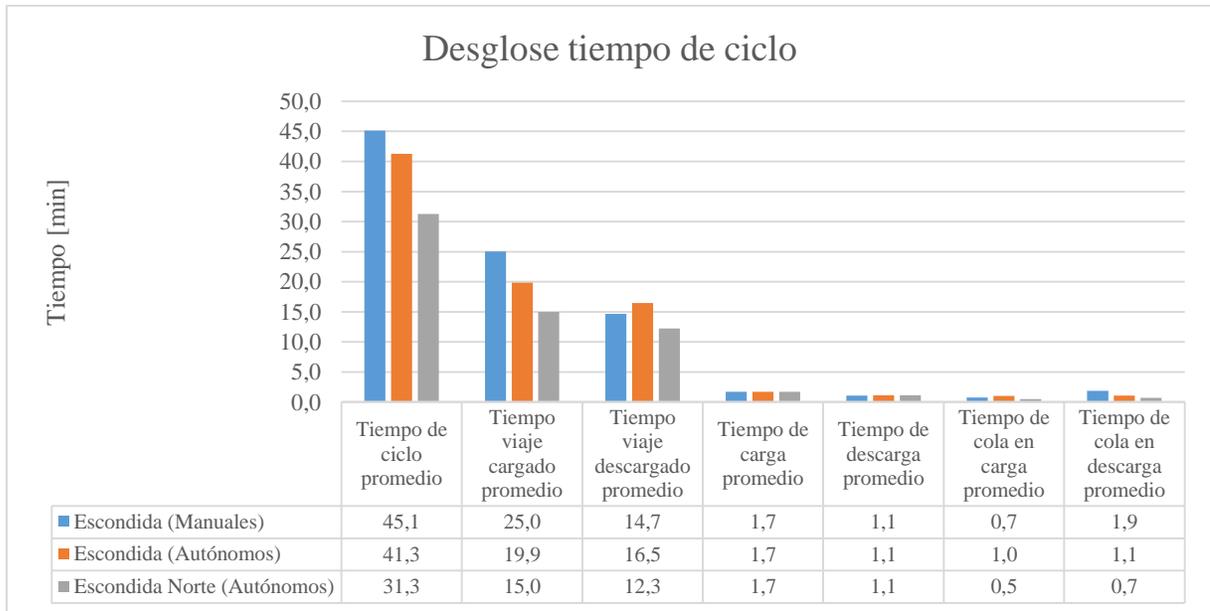
Caso Escondida Norte + P11s&N18 autónomo	Caso base		Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito	
	Manuales	Manuales	Manuales	Autónomos	EN	Manuales	Autónomos	EN	Manuales	Autónomos
Fases	N17 &S4		P11s &N18	EN	N17 &S4	P11s &N18	EN	N17 &S4	P11s &N18	EN
Número de camiones	161	73	42	46	72	41	45	71	40	44
Utilización [%]	81.2	75.9	81.2	77.2	76.0	83.0	76.7	77.0	84.1	78.2
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	86.5	88.3	88.5	86.5	88.1	88.5	86.5	88.0	88.5
HO efectivas (sin colas) [h]	16.4	15.4	17.0	16.1	15.6	17.5	16.3	15.8	17.7	16.6
Tiempo promedio en cola [h]	0.5	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.6	0.9	0.8	0.6

Al revisar los resultados, se puede notar que todos los equipos en este caso presentan utilizaciones bajas respecto a las esperadas. A pesar de esto, no se alcanza el tonelaje planificado para el año y por lo tanto se concluye que el sistema se encuentra en su punto máximo de productividad dadas las restricciones ingresadas.



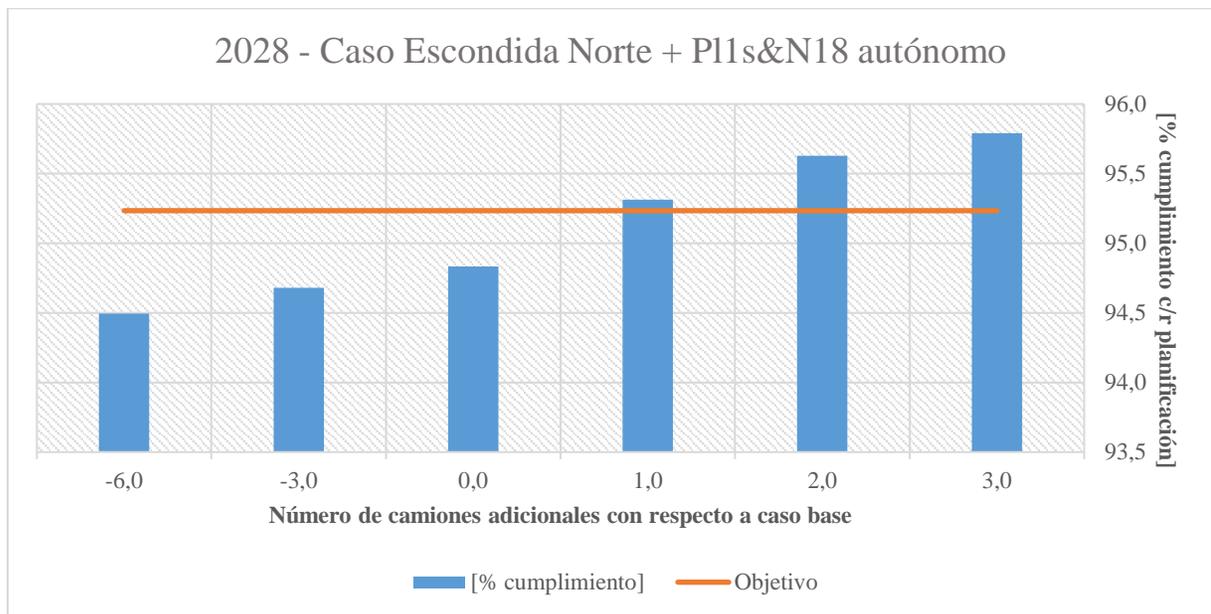
**Gráfico N° 5-49: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.**

En Escondida Norte se alcanzan velocidades promedio altas, tomando en cuenta que se está trabajando con flotas autónomas, lo cual se debe a el desarrollo de fases superficiales nuevas (En13).



**Gráfico N° 5-50: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.**

Pensando en la diferencia de perfiles de velocidad, se esperaría una diferencia más pronunciada entre equipos autónomos y manuales en Escondida, sin embargo, como la flota autónoma trabaja en fases poco profundas (P11s), presenta tiempos de ciclo menores que la manual.



**Gráfico N° 5-51: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó un camión autónomo adicional, lo cual representa uno de los mejores casos analizados.

### **5.2.8 FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma**

Este caso considera dos sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte y otro en las fases S4 y N17 de Escondida. Este caso es el caso contrario al anteriormente presentado.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las mismas modificaciones que en el caso con las fases P11s y N18 autónomas pero invertido para los sistemas que trabajan en el rajo Escondida.

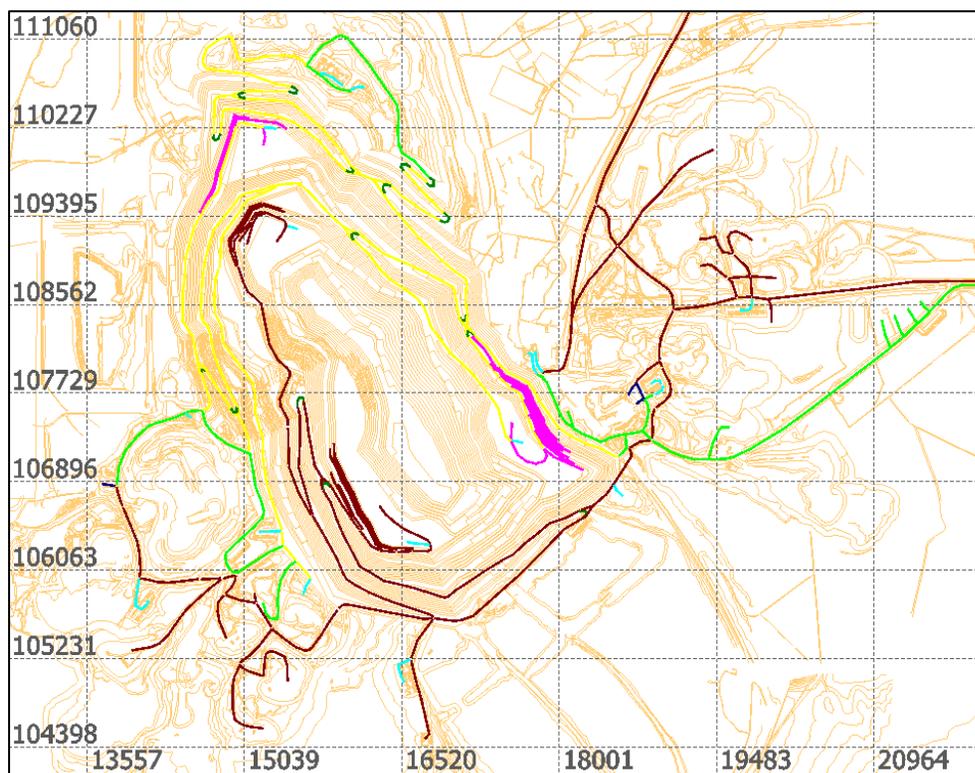


Figura N° 5-13: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso S4 y N17 autónomas, 2027.

Inicialmente se consideran 161 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

Tabla N° 5-37: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.

Sistema	Camiones manuales		Camiones autónomos	
	Escondida P11s&N18		Escondida N17&S4	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Norte + N17&amp;S4 autónomo</b>				
Igual número de camiones que CB	11	31	73	46
1 camión menos en cada circuito	11	30	72	45
2 camiones menos en cada circuito	11	29	71	44

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-38: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

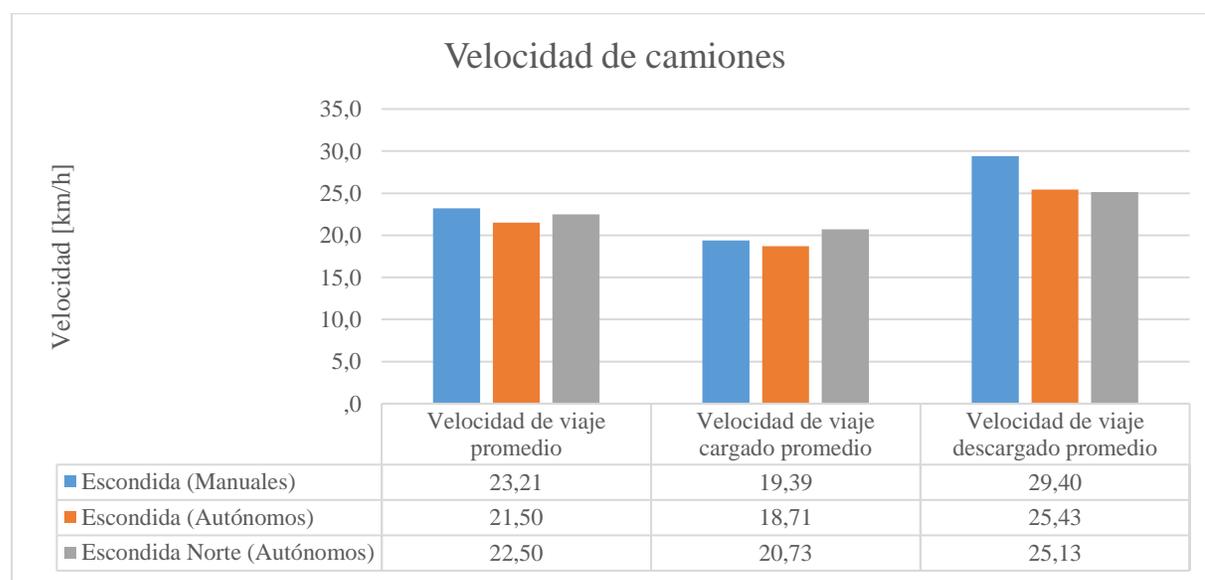
	Producción Escondida P11s&N18	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida Norte	Total	
Simulación	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
Caso base	353,047	487,603	457,761	1,298,410	95.2
<b>Caso Escondida Norte + N17&amp;S4 autónomo</b>					
Igual número de camiones que CB	352,362	471,194	469,141	1,292,697	94.8
1 camión menos en cada circuito	347,242	467,860	469,918	1,285,020	94.3
2 camiones menos en cada circuito	341,557	470,967	468,804	1,281,328	94.0

Al igual que el caso anterior (P11s y N18 autónomas), se alcanza un alto nivel de cumplimiento (94.8%) y las diferencias de tonelaje diario por sistema, a pesar de ser operados con distintas tecnologías, son similares.

**Tabla N° 5-39: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

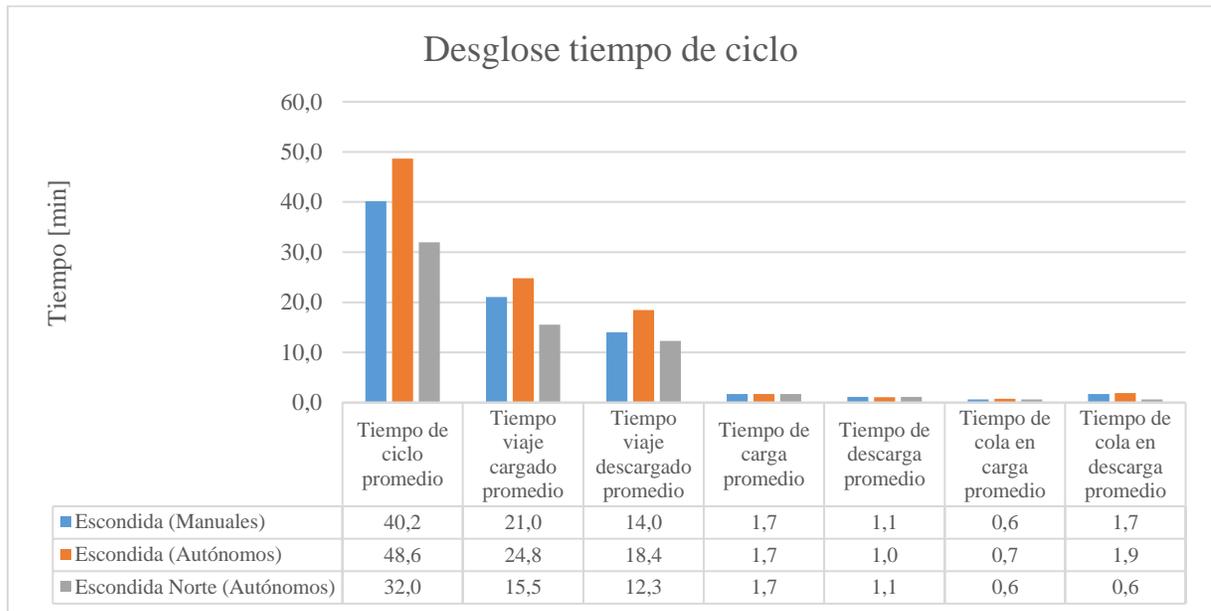
Caso Escondida Norte + N17&S4 autónomo	Caso base	Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito		
		Manuales	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Fases		P11s & N18	N17 & S4	EN	P11s & N18	N17 & S4	EN	P11s & N18	N17 & S4	EN
Número de camiones	161	42	73	46	41	72	45	40	71	44
Utilización [%]	81.2	84.0	77.4	78.0	84.7	77.8	77.8	84.0	78.7	79.6
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	85.8	88.3	88.4	85.9	88.2	88.5	86.1	88.4	88.5
HO efectivas (sin colas) [h]	16.4	17.0	16.1	16.2	17.2	16.1	16.6	17.4	16.5	16.9
Tiempo promedio en cola [h]	0.5	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7

En este caso, la utilización de los equipos manuales alcanza un máximo de 84%. Las flotas autónomas de camiones, sin embargo, no alcanzan ni siquiera un nivel de utilización cercano al de un equipo manual.



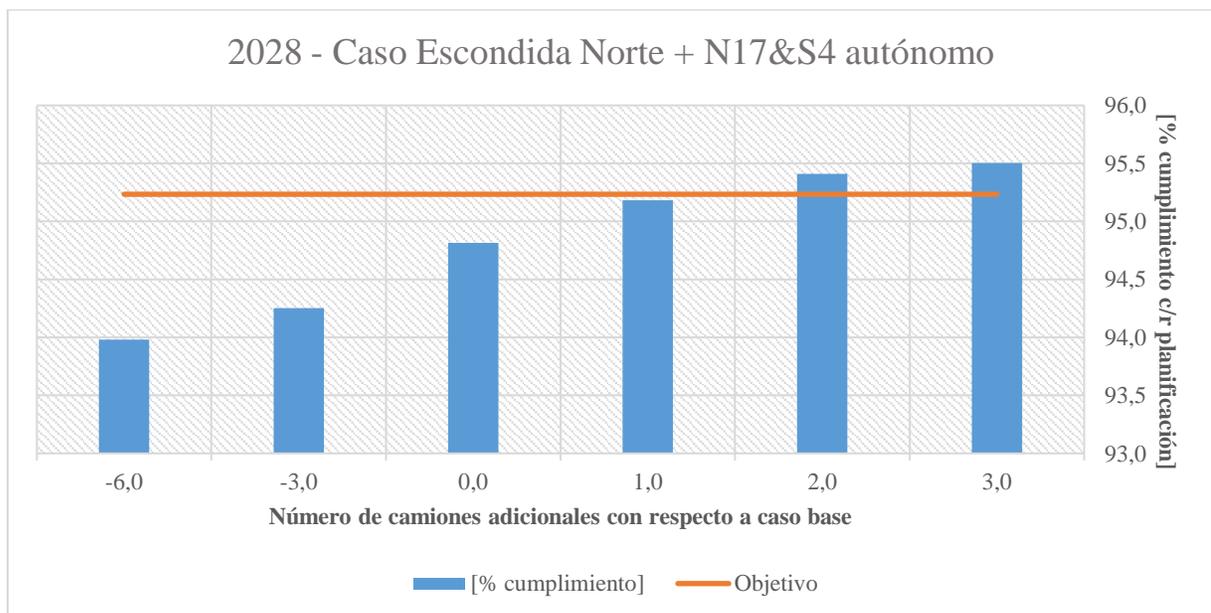
**Gráfico N° 5-52: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

Nuevamente se nota una tendencia al alza en las velocidades de flotas de camiones autónomos en Escondida Norte debido al desarrollo de bancos superficiales de fases nuevas.



**Gráfico N° 5-53: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

Contrario al caso anterior, se tienen menores tiempos de ciclo en las flotas de camiones manuales en Escondida y se debe al desarrollo de la fase P11s.



**Gráfico N° 5-54: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó un camión autónomo adicional (al igual que el caso anterior).

### 5.2.9 FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma

Este caso considera tres sistemas en los cuales operan camiones autónomos de manera independiente y con vías exclusivas, uno en el rajo Escondida Norte, uno en las fases P11s y N18 y otro en las fases S4 y N17 de Escondida.

El *layout* de la mina y plan de producción consideran las mismas modificaciones que ambos casos con proyecto del año 2028, considerando que los dos sistemas que operan en Escondida trabajan con flotas autónomas de camiones.

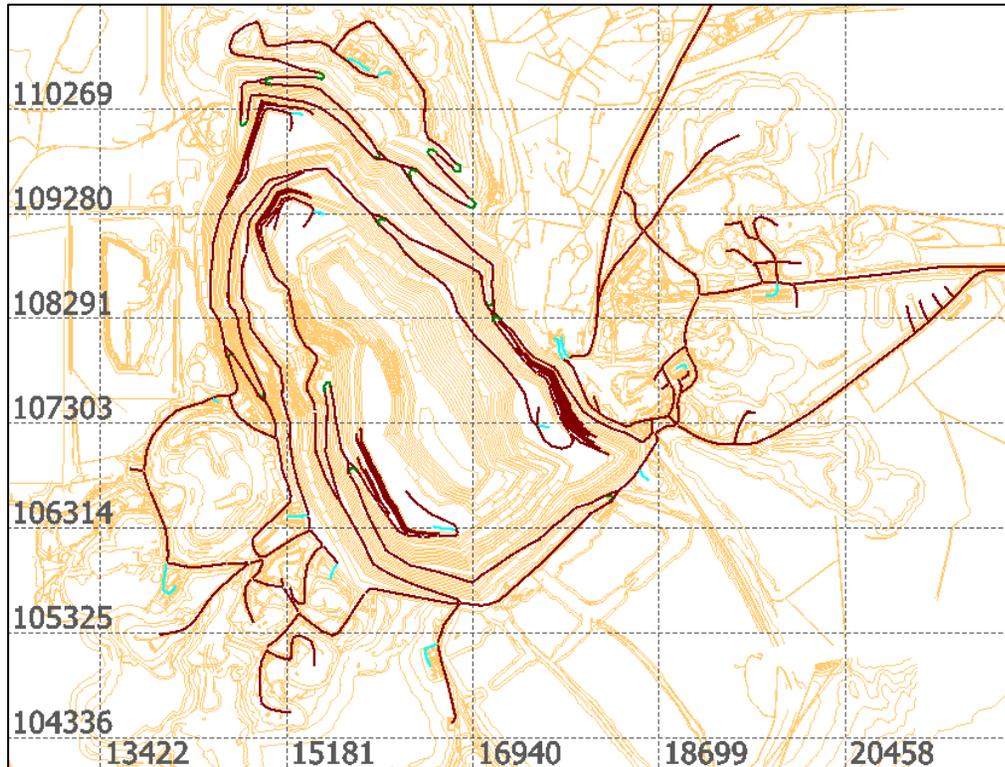


Figura N° 5-14: División de rutas por sistema de camiones manuales y autónomos en Escondida en caso *full* autónomo, 2027.

Inicialmente se consideran 161 camiones (caso base), los cuales se dividen para satisfacer las necesidades de ambos sistemas. La cantidad de camiones considerado para cada simulación se presentan a continuación:

Tabla N° 5-40: Número de camiones para simulaciones en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.

Sistema	Camiones autónomos		
	Escondida P11s&N18	Escondida N17&S4	Escondida Norte
Tipo de camión	KOM 980E	KOM 980E	KOM 980E
<b>Caso Escondida Full autónomo</b>			
Igual número de camiones que CB	42	73	46
1 camión menos en cada circuito	41	72	45
2 camiones menos en cada circuito	40	71	44

Teniendo en cuenta el mantener la disponibilidad mecánica de los equipos considerados, definiendo mantenencias planeadas cuando fuera necesario, se tienen los siguientes resultados para las simulaciones:

**Tabla N° 5-41: Producción diaria resultante para simulaciones en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.**

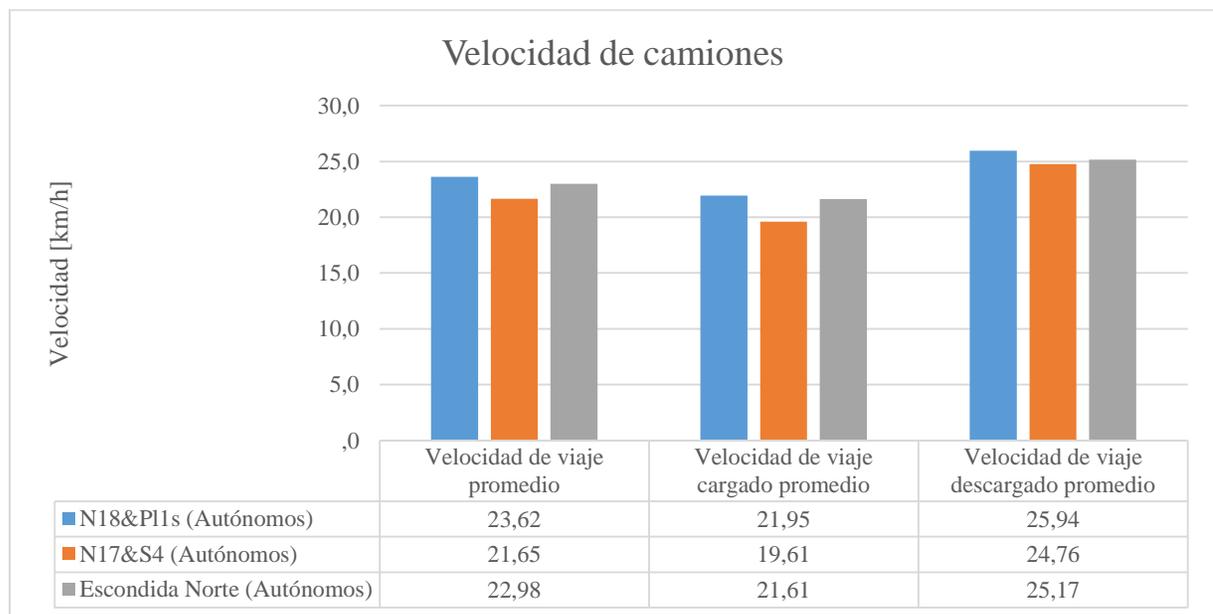
Simulación	Producción Escondida P11s&N18	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida Norte	Total	
	[t]	[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
<b>Caso base</b>	353,047	487,603	457,761	1,298,410	95.2
<b>Caso Escondida Full autónomo</b>					
<b>Igual número de camiones que CB</b>	359,434	470,561	472,807	1,302,802	95.6
<b>1 camión menos en cada circuito</b>	362,611	472,865	472,093	1,307,570	95.9
<b>2 camiones menos en cada circuito</b>	361,759	477,607	467,145	1,306,512	95.8

En este caso, el caso con tres sistemas autónomos independientes, se obtiene el mayor cumplimiento de lo planificado para el año analizado, superando al caso base. Otro aspecto a tomar en cuenta es que, al disminuir la cantidad de camiones en operación, aumenta el tonelaje de material transportado diario.

**Tabla N° 5-42: KPI resultantes para simulaciones en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.**

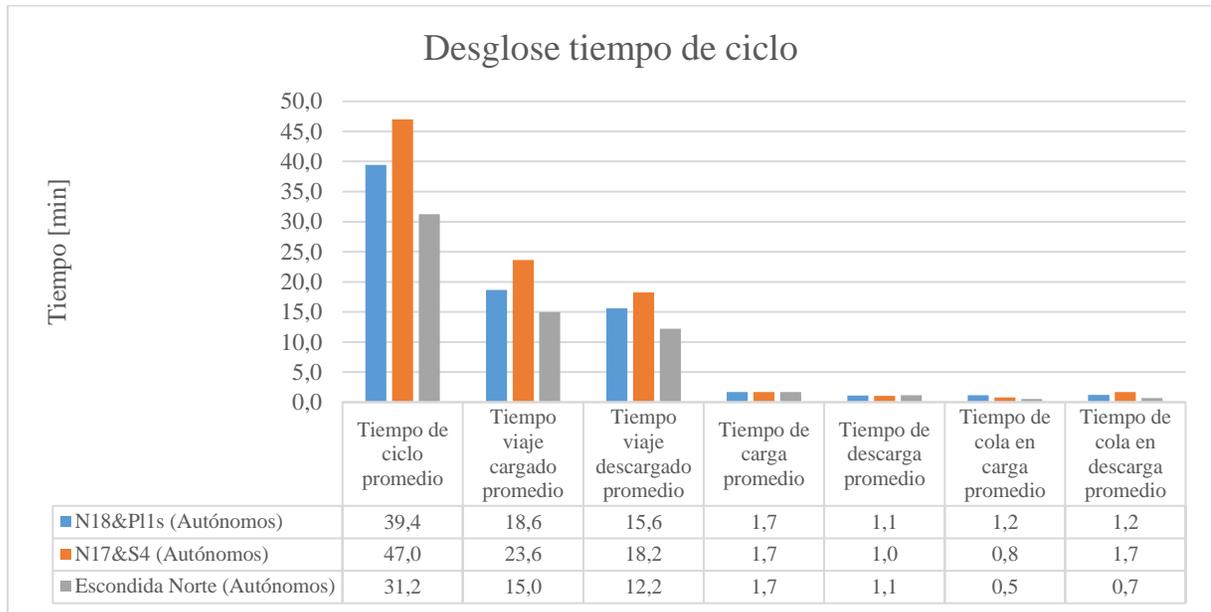
Caso Escondida Full autónomo	Caso base	Igual N° camiones			1 camión menos en cada circuito			2 camiones menos en circuito		
	Manuales	Autónomos			Autónomos			Autónomos		
Fases		P11s &N18	N17 &S4	EN	P11s &N18	N17 &S4	EN	P11s &N18	N17 &S4	EN
<b>Número de camiones</b>	161	42	73	46	41	72	45	40	71	44
<b>Utilización [%]</b>	81.2	78.0	75.4	77.2	78.7	76.7	76.8	81.6	78.5	79.9
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	86.0	88.1	88.3	88.4	88.4	88.3	88.5	87.9	88.3	88.2
<b>HO efectivas (sin colas) [h]</b>	16.4	16.1	15.6	16.0	16.6	15.9	16.3	16.9	16.3	16.6
<b>Tiempo promedio en cola [h]</b>	0.5	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.6	0.8	0.8	0.6

Todos los circuitos de camiones autónomos presentan bajos niveles de utilización incluso al compararlo con camiones autónomos. Las horas operativas efectivas son muy similares a los de los camiones manuales en el caso base.



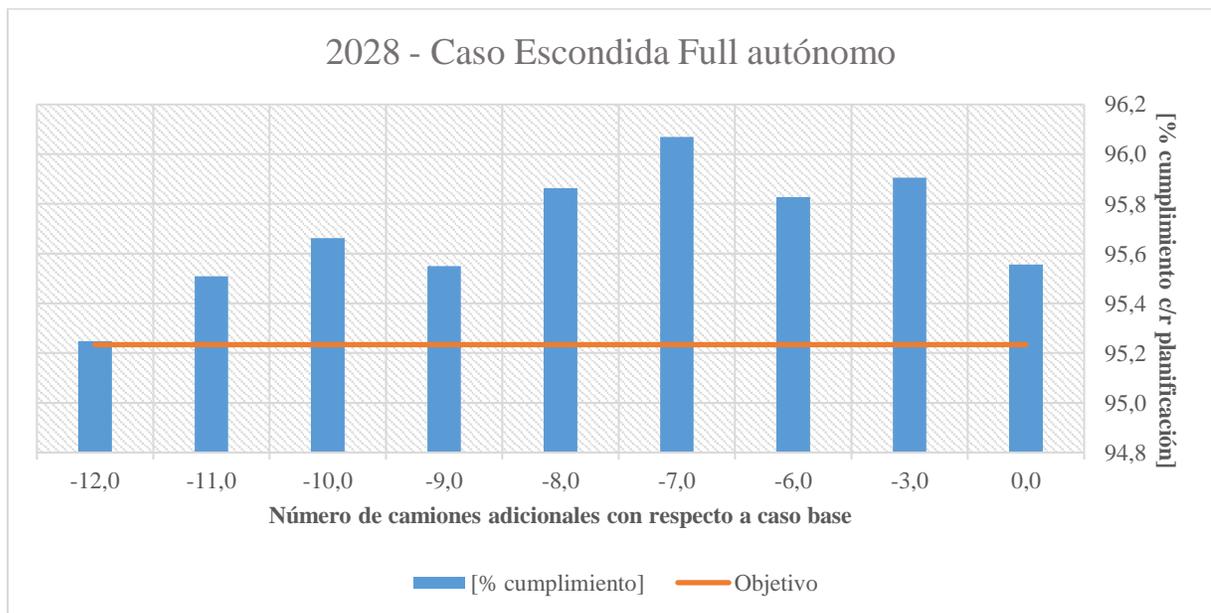
**Gráfico N° 5-55: Velocidad promedio en ciclos de camiones en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.**

Con el mismo tipo de tecnología implementada en cada sistema, el gráfico de velocidades promedio indica qué tanto tiempo los camiones desarrollan actividades en plano horizontal (presentan mayores velocidades promedio).



**Gráfico N° 5-56: Desglose de tiempo de ciclo promedio en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.**

Como se había visto anteriormente, las fases más superficiales presentan tiempos de ciclo menores (P11s) y las más profundas, tiempos de ciclo mayores (S4).



**Gráfico N° 5-57: Análisis exploratorio de número de camiones que iguala producción de simulación de caso base en caso Escondida *full* autónomo, FY 2028.**

El análisis exploratorio de cantidad de camiones requeridos para alcanzar la producción del caso base arrojó que se puede disminuir en 12 la cantidad de camiones y aun así se tiene el cumplimiento del caso con camiones manuales.

## 6 DISCUSIÓN

Las tecnologías autónomas representan un cambio tecnológico y cultural para enfrentar los desafíos actuales de la industria minera. Se espera que este impacto se presente tanto a nivel técnico, teniendo en cuenta efectos en el diseño y planificación minera, como a nivel social, influyendo positivamente en la vida de los trabajadores y comunidades afectadas.

A partir de los resultados obtenidos para cada caso evaluado, a continuación, se presentan las conclusiones más importantes del estudio.

### 6.1 Casos base

Al analizar los resultados obtenidos de las simulaciones de los casos base, en general, se tiene un alto cumplimiento de los planes de producción diarios proyectados para los años simulados (sobre el 93% de cumplimiento para los años 2024-2025 y sobre el 95% para los años 2026-2028). Se debe mencionar que se tiene un mejor desempeño en los frentes del rajo Escondida Norte por los menores tiempos de ciclo que presentan los camiones asociados a sus circuitos de extracción.

**Tabla N° 6-1: Cumplimiento del plan de producción diario de las simulaciones en los casos base.**

	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Plan de producción [t]</b>	1,381,429	1,358,642	1,392,920	1,365,990	1,363,393
<b>Simulaciones [t]</b>	1,292,969	1,267,157	1,340,096	1,314,928	1,299,278
<b>Cumplimiento [%]</b>	93.60	93.27	96.21	96.26	95.30

Como se presenta a continuación, las velocidades promedio en los ciclos, dados los perfiles de velocidad ingresados al sistema de los camiones manuales considerados, se mantienen en el rango 22.5-23.5 [km/h]. Se puede notar que para los años 2024-2025 se tienen velocidades un poco más altas, lo cual se condice con que, a pesar de que las distancias de ciclo son mayores, para tales años las fases de Escondida Norte y las fases N17 y N18 de Escondida no son tan profundas aún, por lo que tienen que recorrer menos caminos en pendiente. Otro punto destacable son las toneladas por km recorrido, las cuales se ubican en general en un rango de 22-25 [t/km recorrido], excepto para el año 2025 que son un tanto mayores, esto por una baja en las distancias de ciclo (en comparación al año 2024) y velocidades mayores (a los años 2026-2028) que se traduce en mayor tonelaje por día.

**Tabla N° 6-2: Resultados de ciclos de camiones en casos base.**

	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Distancia de ciclo promedio [km]</b>	15.40	14.02	13.11	12.87	13.61
<b>Tiempo de ciclo promedio [min]</b>	39.28	36.25	34.56	34.13	36.25
<b>Velocidad promedio [km/h]</b>	23.53	23.20	22.76	22.62	22.53
<b>Distancia de viaje cargado de ciclo promedio [km]</b>	6.98	6.27	5.88	5.81	6.15
<b>Tiempo de viaje cargado promedio [min]</b>	21.63	19.80	19.07	18.58	20.07
<b>Velocidad promedio cargado [km/h]</b>	19.36	18.99	18.51	18.77	18.40
<b>Distancia de viaje vacío de ciclo promedio [km]</b>	6.62	6.03	5.57	5.49	5.83
<b>Tiempo de viaje vacío promedio [min]</b>	12.73	11.73	11.00	11.11	11.70
<b>Velocidad promedio vacío [km/h]</b>	31.18	30.84	30.38	29.63	29.92
<b>Tiempo en colas promedio [min]</b>	2.05	1.88	1.68	1.66	1.62
<b>Toneladas por kilómetro recorrido [t]</b>	22.97	28.01	24.55	22.51	23.23

Se tiene una mayor utilización de los camiones para los años 2024-2025 en comparación a los años 2026-2028, lo cual se debe al suavizamiento de la cantidad de camiones requeridos en el *FleetAnalyzer*, que considera menos camiones de los requeridos para los primeros años y más camiones para los años posteriores. En el año 2028 es cuando se tiene la menor utilización de camiones según la simulación.

**Tabla N° 6-3: Índices operacionales de casos base.**

	Objetivo	2024	2025	2026	2027	2028
HO efectivas (sin colas) [h]		17.0	17.0	16.4	16.9	16.4
Tiempos en cola [h]		0.8	0.8	0.7	0.8	0.5
Utilización [%]	83.0	82.9	83.2	82.1	82.9	81.2
Disponibilidad mecánica [%]	86.0	86.5	86.4	86.0	86.2	86.0

Se debe notar que en general, se cumplen los valores comprometidos al LoA 19 en las distintas simulaciones, lo que da validez a la simulación de estos años. Un aspecto por resaltar es que estos parámetros operacionales son bastante altos en comparación a los que tienen otras faenas en la industria minera del cobre.

## 6.2 Casos con proyecto

Para esta sección se separará lo que fueron las simulaciones para el caso de la autonomía de las flotas que operan en el rajo Escondida Norte y Escondida.

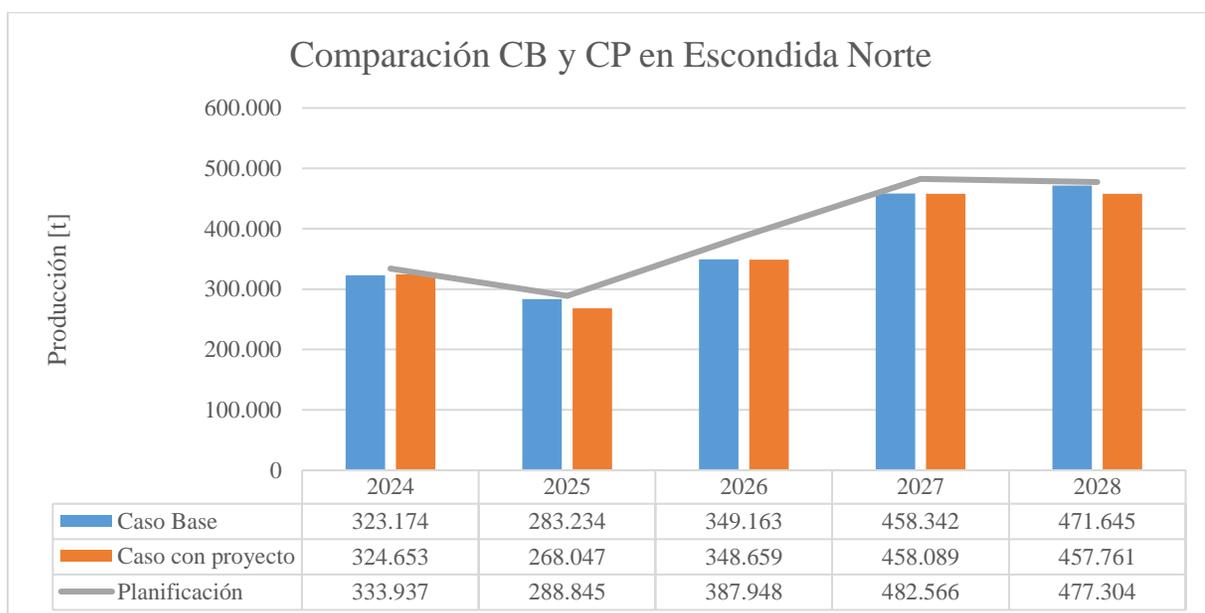
### 6.2.1 Escondida Norte

Escondida Norte es un sistema fácil de aislar, dada la infraestructura presente cercana a este rajo y por la independencia de chancado, stocks y botaderos a los cuales se transporta el material extraído.

Las modificaciones al *layout* y el plan de producción principales que se debieron establecer para realizar el estudio corresponden a:

- ❖ Definir stocks intermedios para mineral que tuviera como destino el chancador 4 (óxidos o mixtos de cobre), en los cuales la flota autónoma deposite el material y este sea remanejado a través de la flota manual operando en Escondida.
- ❖ Definir un estacionamiento al cual lleguen los camiones autónomos que requiera mantenciones, y desde esta locación, sean conducidos por un operador al *truck shop* de la faena (para no tener un CAPEX alto por remodelación o construcción de un nuevo taller).
- ❖ Considerar el tener dos pisos independientes en las pilas de lixiviación para que cada flota deposite mineral sin haber interferencias entre las mismas.

A continuación, se presentan los resultados de producción diaria simuladas en el caso base (con camiones manuales) y en el caso con proyecto (con misma dotación de camiones, pero autónomos).



**Gráfico N° 6-1: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base (flota manual) y el caso con proyecto (flota autónoma) en Escondida Norte.**

Considerando que se trata de toneladas diarias, se tiene en promedio 2 millones de toneladas de material anual de diferencia entre el caso base y el caso con proyecto (95.7% vs 94.1% de cumplimiento para el caso base y con proyecto respectivamente). Esto se atribuye principalmente a la menor flexibilidad que presenta el sistema al separarse del sistema Escondida.

**Tabla N° 6-4: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en Escondida Norte.**

	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Número de camiones</b>	28.0	22.0	34.0	52.0	46.0
<b>Utilización [%]</b>	89.4	90.0	87.8	83.7	77.6
<b>Disponibilidad mecánica [%]</b>	88.4	88.2	88.2	88.4	88.5
<b>HO efectivas (sin colas) [h]</b>	18.8	19.0	18.4	17.6	16.2
<b>Tiempo promedio en cola [h]</b>	0.8	0.5	0.6	0.6	0.6

Las utilizaciones de camiones autónomos resultan ser en promedio mayores a las de los camiones manuales y se deben a una menor cantidad de detenciones derivadas de actividades de operadores (colaciones y cambios de turno). Se puede ver, al igual que en el caso base, una tendencia a la disminución de las utilizaciones por año de los equipos, lo cual se debe a el suavizamiento del número de camiones disponibles para cada año simulado (al comienzo se tienen menos y luego se tienen más de los requeridos). El caso crítico corresponde al año 2028 en el cual el desempeño en este ítem resulta menor que los camiones manuales.

La disponibilidad mecánica sigue el comportamiento de los inputs que consideran una mejora en este indicador de 2 puntos porcentuales con respecto a los camiones manuales.

### 6.2.1.1 Recomendación Escondida Norte autónomo

Como se presentó, Escondida Norte tiene la gran ventaja de ser un sistema aislable para aplicar flotas de camiones autónomos con vías exclusivas. Revisando los resultados, la autonomía se acerca bastante a lo que es la producción del caso base en el cual se trabaja con camiones manuales. Considerando que este estudio analiza la posibilidad de integración de estas nuevas tecnologías a la operación existente, se puede decir que presenta una oportunidad que convendría analizar en mayor detalle. Las virtudes de la integración de esta nueva tecnología, expuestas en la revisión bibliográfica (mayor constancia y confianza en el sistema, menores detenciones, uso eficiente de recursos, seguridad en la operación y ahorro de costos derivados del trabajo de un operador), también sustentan una investigación en la cual se estudie la factibilidad real de realizar los cambios requeridos para utilizar esta tecnología.

### 6.2.2 Escondida

Considerar la automatización en el rajo Escondida resulta más complejo que en el caso anterior. En primer lugar, se tienen restricciones (al menos para el caso de la tecnología Komatsu) para la cantidad de camiones que se puede tener operando simultáneamente y, en segundo lugar, para comenzar el cambio de tecnología, se debe dividir el rajo en zonas donde se podría aplicar esta tecnología, pero con la dificultad de que los destinos del material se comparten en distintas fases.

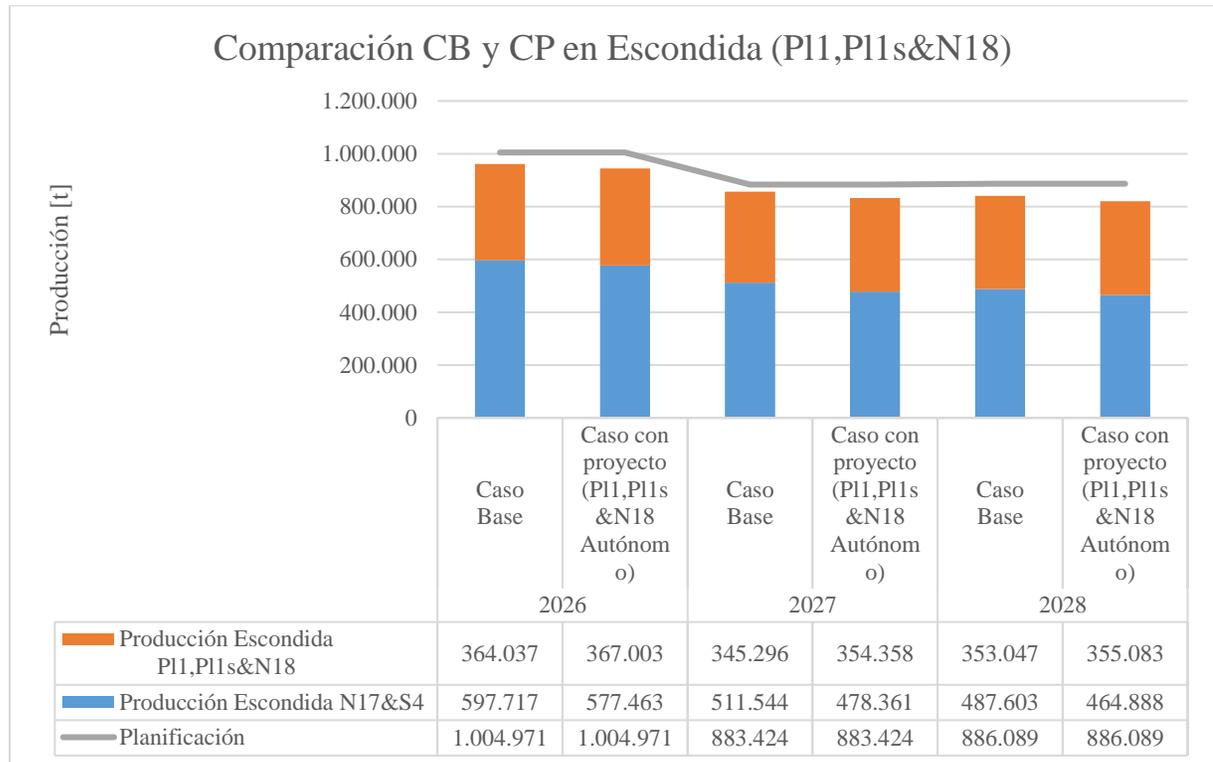
Las modificaciones al *layout* y el plan de producción principales que se debieron establecer para realizar el estudio corresponden a:

- ❖ Considerar el tener 3 pisos activos en las pilas estáticas de lixiviación, de manera de dividir el sistema en zonas de descarga de los dos sistemas autónomos (considerando el de Escondida Norte) y, por otro lado, el sistema manual.
- ❖ Definir stocks nuevos para que cada sistema tenga su propio destino de mineral y que no existan interferencias entre flotas de distinta tecnología.
- ❖ Como se tiene sólo una intersección entre rutas de caminos de flotas autónomas y manuales, se debe considerar construir un camino sobre o bajo nivel, o instalar en los equipos manuales dispositivos que permitan rastrear en línea su ubicación y fijar los permisos de cruce (con prioridad para camiones autónomos).
- ❖ Realizar una segunda vía paralela a la que llega a las pilas de lixiviación, para mantener la exclusividad de rutas de cada tecnología.
- ❖ Restringir el uso de los chancadores para intentar tener exclusividad para cada sistema, y cuando no se pueda, operar con campañas de uso de los mismos.
- ❖ Crear una entrada exclusiva para camiones autónomos al *truck shop* principal.
- ❖ Restringir el uso de rampas de fases cuando fuese necesario.
- ❖ Redirigir el material con destino a botaderos que tuvieran accesos por rutas del otro sistema que opera simultáneamente en Escondida.

A continuación, se presentará la información para cada una de las configuraciones propuestas:

### 6.2.2.1 Autonomía en fases P11, P11s y N18

Debido a que estas fases comparten muchas de sus rutas y destinos, no puede considerarse el aplicar tecnología autónoma en una sin aplicarla en las otras.



**Gráfico N° 6-2: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en fases P11, P11s y N18 en Escondida.**

En general, las fases con autonomía alcanzan los valores obtenidos en los casos base, pero las fases con sistemas manuales no. Esto se debe a que se restringe el uso de rampas para las fases N17 y S4 y se redirige el material a locaciones un poco más lejanas, pero que se encuentran dentro de sus zonas de trabajo. Considerando que se trata de toneladas diarias, la diferencia promedio anual entre la producción de Escondida, entre el caso base y el caso con proyecto, son 7.5 millones de toneladas de material (95.8% vs 93.6% de cumplimiento para el caso base y con proyecto respectivamente).

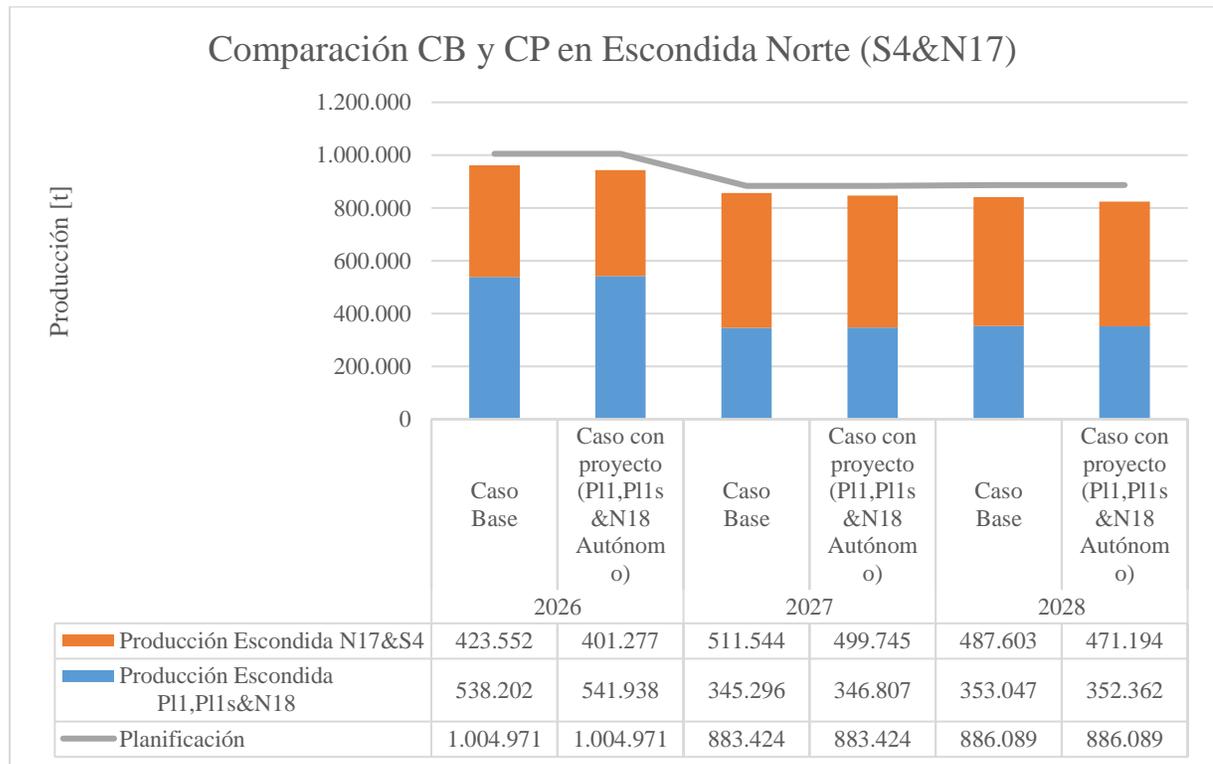
**Tabla N° 6-5: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en el caso con proyecto de flota autónoma en fases P11, P11s y N18 en Escondida.**

Tipo de camión	2026		2027		2028	
	Manual N17&S4	Autónomo P11&N18	Manual N17&S4	Autónomo P11&P11s&N18	Manual N17&S4	Autónomo P11s&N18
Número de camiones	85	45	73	30	73	42
Utilización [%]	82.2	85.7	81.9	82.8	75.9	81.2
Disponibilidad mecánica [%]	85.8	88.5	86.4	88.5	86.5	88.3
HO efectivas (sin colas) [h]	16.7	18.2	16.7	17.3	15.4	17.0
Tiempo promedio en cola [h]	0.8	1.0	0.9	0.6	0.8	0.8

En general, se tienen utilizaciones más altas para el sistema de camiones autónomos que manuales, pero para los años 2027 y 2028, éstas son comparables a las de camiones manuales en los casos base.

### 6.2.2.2 Autonomía en fases S4 y N17

En este caso, se planea la autonomía solamente para la fase S4 inicialmente en el año 2026 (debido a la cantidad de camiones a adquirir de un año a otro, que serían 49) y luego, en los siguientes años, por compartición de rutas, se integra a este sistema la fase N17 (alcanzando una flota de 73 camiones).



**Gráfico N° 6-3: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en fases S4 y N17 en Escondida.**

Similar al caso anterior, el sistema de las fases P11, P11s y N18 (flota manual) presenta un mejor cumplimiento que el de las fases N17 y S4 (flota autónoma), por la desviación de rutas. Considerando que se trata de toneladas diarios, la diferencia promedio anual entre la producción de Escondida, entre el caso base y el caso con proyecto, son 5.6 millones de toneladas de material (95.8% vs 94.0% de cumplimiento para el caso base y con proyecto respectivamente). Estos resultados son mejores que en el caso de autonomía en las fases P11, P11s y N18.

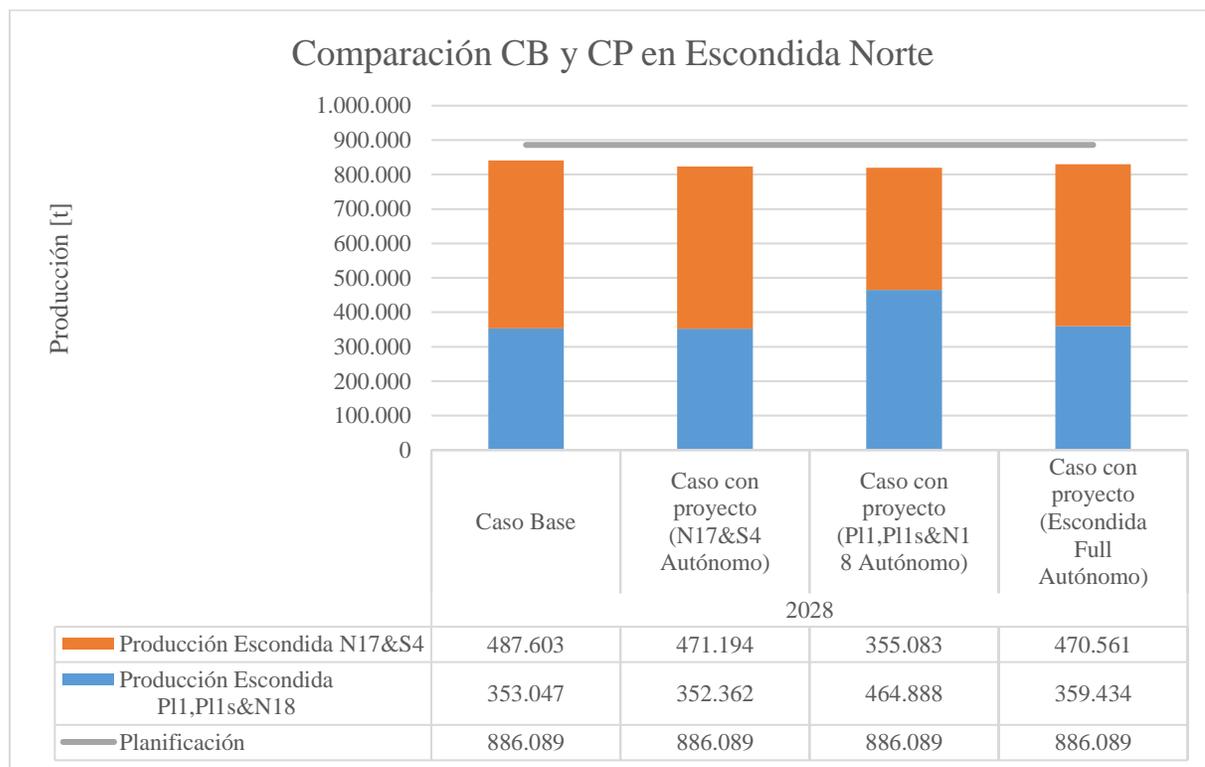
**Tabla N° 6-6: Índices operacionales de casos con proyecto de autonomía en el caso con proyecto de flota autónoma en fases S4 y N17 en Escondida.**

Tipo de camión	2026		2027		2028	
	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos	Manuales	Autónomos
Fases	N17&P11&N18	S4	P11&P11s&N18	N17&S4	P11s&N18	N17&S4
Número de camiones	81	49	30	73	42	73
Utilización [%]	72.9	83.5	81.7	82.9	84.0	77.4
Disponibilidad mecánica [%]	85.8	88.5	86.2	88.5	85.8	88.3
HO efectivas (sin colas) [h]	14.6	17.6	16.6	17.3	17.0	16.1
Tiempo promedio en cola [h]	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8	0.8

Considerando la misma flota que en caso anterior para cada sistema, para los años 2027 y 2028 (ya que la división es la misma), se tiene que los camiones autónomos presentan baja utilización con respecto a la esperada, a pesar de que no se cumpla con el material transportado planificado.

### 6.2.2.3 Full autonomía (año 2028)

Este caso, que se realizó como un análisis de sensibilidad, presentó los mejores resultados con respecto al caso base. Este caso opera con tres sistemas autónomos con vías exclusivas independientes.



**Gráfico N° 6-4: Comparación de resultados de producción simulados para el caso base y el caso con proyecto de flota autónoma en Escondida.**

Se tiene una producción en el caso full autónomo de 10 mil toneladas diarias bajo el caso base, en comparación a las casi 20 mil de los otros casos. Se debe tener en cuenta los datos presentados en la sección de resultados, en los cuales se mostraba que ninguno de los camiones autónomos alcanza una utilización sobre el 80%. Aún con esto, se está lejos de lo planificado.

#### 6.2.2.4 Recomendación Escondida autónomo

Las actuales tecnologías disponibles no permiten con certeza tener más de 80 camiones autónomos en operación. Para que Escondida pueda operar con autonomía en equipos de transporte, deben considerarse sistemas independientes, en los cuales en algunas fases se trabaje con flotas autónomas y en otras con flotas manuales. La necesidad de exclusividad de vías genera complicaciones al definir el plan de producción mina, pues se cuenta con destinos compartidos por el material proveniente de distintos sectores. Como se mencionó anteriormente, el definir nuevos stocks y/o redirigir material a otras locaciones, genera que los camiones tengan que recorrer distancias más largas y, por lo tanto, aumenten los tiempos de ciclo por origen-destino.

Los estudios de las simulaciones indican, en general, que la autonomía no permite alcanzar los resultados del caso base, a pesar de que exista un mayor tiempo en reserva de los camiones por restricciones propias del sistema (tiempo de espera en colas y capacidad de chancado). La recomendación, si se integrara este tipo de camiones, sería el comenzar por las fases S4 y N17, que además de presentar mejores resultados, son afectas a mayores problemas de seguridad (riesgo geotécnico por profundización de fases y traslado de tranque de relaves Hamburgo). Sin embargo, se debe destacar la gran cantidad de camiones requeridos para trabajar en esta zona (sobre 70) que puede generar complicaciones en el *software* de cómputo. Se debe mencionar también que, según estudios realizados por Minera Escondida, se tendría que considerar para este rajo revisar los diseños actuales por mayor espacio requerido por la tecnología autónoma.

En conclusión, se deben realizar estudios de costos más profundos, considerando cambios más radicales a los planes de extracción (corriendo el *PlanProcess* con las restricciones de cada fase a tomar en cuenta para la autonomía), de la infraestructura presente actualmente (analizar la posibilidad de crear stocks auxiliares y definir botaderos específicos), de los diseños y actual estado de los componentes del rajo y de los accesos a distintos destinos a los cuales se dirige el material, para pensar en integrar este adelanto a la operación.

## 7 CONCLUSIÓN

Los sistemas de transporte de material autónomos son la tecnología de vanguardia en la industria minera actual. El equipo de planificación minera a largo plazo, considerando el futuro estratégico de Minera Escondida, se encuentra analizando la posibilidad de integrar estos nuevos avances a sus operaciones considerando todos los proyectos que tiene en cartera.

La integración de camiones autónomos a operaciones a rajo abierto presenta varias ventajas en contraste con la tecnología manual.

- a) Beneficios técnicos
  - i. Seguridad: disminuye la cantidad de operadores en terreno, reduciendo las situaciones de riesgo.
  - ii. Confiabilidad en el sistema: en general el sistema presenta una menor incertidumbre operacional dada por una mayor constancia en el modo en que se conducen los equipos.
  - iii. Mayor utilización: al no requerir de cambios de turno o colaciones, el equipo puede trabajar por una mayor cantidad de tiempo sin detenerse.
  - iv. Mayor disponibilidad mecánica: dada por una menor variabilidad del modo de operación, los equipos sufren de menores fallas.
- b) Beneficios económicos
  - i. Reducción de costos de mantención: por la mayor durabilidad de los componentes de los equipos.
  - ii. Reducción de insumos de neumáticos: los equipos autónomos, dada la constancia de operación, alcanzan vidas útiles de neumáticos mayores.
  - iii. Uso eficiente de combustible: al operar bajo las condiciones entregadas por proveedores, los equipos logran un mejor uso de combustible en la operación.
  - iv. Reducción de operadores: al requerir de una menor dotación de personal en faena, se pueden reducir costos de operación.

Considerando los beneficios técnicos de la implementación de esta tecnología, Minera Escondida busca evaluar, por medio de simulaciones, la aplicabilidad de sistemas autónomos en los rajos Escondida Norte y Escondida. El proyecto se realizó utilizando el *software* DSim del laboratorio de planificación minera Delphos de la Universidad de Chile. A través de los reportes del programa, se reconocieron y compararon diversos KPI de la operación para camiones y palas, junto con la producción total del sistema.

En primer lugar, se realizaron simulaciones los años a analizar (FY2024-FY2028) con los parámetros de operación que se tienen actualmente. Se considera para esto, el uso de tecnología manual de camiones de modelos de alta capacidad como lo son los CAT 797 y Komatsu 960E, y palas de cable de 73 [yd3] tanto para extracción como remanejo de material. Los parámetros técnicos y de detenciones, tanto programadas como no programadas, utilizados para estas flotas son estimados a partir de información histórica que provee la faena. Por otro lado, el plan de producción y las rutas se obtienen a partir de definiciones del LoA19 corridas en *software* de planificación minera (*MineHaul2* y *FleetAnalyzer*).

Los resultados de los casos base son que se obtiene un promedio de 94.9% de cumplimiento del total de material requerido a transportar diariamente en los años simulados. Cabe destacar que se tiene que los equipos asociados a frentes con destinos más cercanos presentaban mayores cumplimientos que el resto, por el modo en que DSim realiza el *Dispatch*. Respecto a parámetros operacionales de camiones como la utilización y la disponibilidad mecánica, se cumplen los valores comprometidos al LoA 19 en las distintas simulaciones (82.5% frente a un 83% de UT y un 86.2% frente a un 86% de DM), lo que da validez los inputs ingresados, al programa con el cual se trabajó y a las simulaciones de los años estudiados.

En segundo lugar, se definieron los escenarios a ser simulados con camiones autónomos, tomando en consideración las restricciones propias de la tecnología, la exclusividad de rutas para que no existan interferencias en la operación, una máxima tasa de incorporación de equipos año a año y la experiencia con el uso de la tecnología. Los casos propuestos son los siguientes:

- a) FY 2024 → Aislación y autonomía de Escondida Norte
- b) FY 2025 → Aislación y autonomía de Escondida Norte
- c) FY 2026 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fase S4 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida
- d) FY 2027 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida
- e) FY 2028 → Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida  
→ Aislación y autonomía de Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida  
→ Autonomía de Escondida Norte y Escondida

Escondida Norte resulta ser un sistema fácil de aislar debido a la infraestructura y destinos independientes que presenta. El resultado de las simulaciones es que la autonomía aplicada en este rajo alcanza cumplimientos anuales relativamente cercanos a los de los casos base (94.1% vs 95.7% respectivamente). La utilización de estos equipos en promedio llega al 85.7% lo cual constituye una mejora en 3 puntos porcentuales con respecto al caso base, lo que se traduce en 1.3 horas operativas efectivas adicionales. Dadas las ventajas estipuladas y certificadas en operación que presenta este avance frente a los camiones manuales, se recomienda para este caso, proceder a en mayor detalle los costos asociados a la implementación de esta tecnología.

Escondida, al igual que Escondida Norte, es un sistema completo y, por lo tanto, zonificar resulta una tarea compleja. Para conseguir la exclusividad de rutas de cada sistema se debió establecer la creación y ubicación de stocks adicionales, asegurar accesos nuevos a botaderos, definir exclusividad de chancadores para cada sistema y finalmente asignar el uso de rampas para cada fase en la cual se está extrayendo mineral. Los resultados de las simulaciones indican que la mejor de las propuestas de sistemas para comenzar la autonomía corresponde al caso en que se ocupan flotas autónomas en las fases S4 y N17 ya que se obtienen cumplimientos mayores del tonelaje transportado (94% vs 93.6% del sistema P11, P11s y N18 autónomo). Aun así, la diferencia de producción con el caso base es importante (1.8% de cumplimiento, que por la gran envergadura de Escondida resulta en 5.6 millones de toneladas anuales menos). Otro punto a destacar es que se obtienen utilidades relativamente bajas en comparación a lo esperado (79.5% para la zona

manual y 81.2% para la autónoma) que se deben a las restricciones propias del sistema y la menor flexibilidad de la asignación dinámica de camiones. Para este caso, se recomienda efectuar estudios en mayor detalle, para saber si se puede efectivamente realizar los cambios propuestos al *layout* de la mina y cuantificar los costos asociados a la implementación de esta tecnología.

A modo de conclusión, se destaca que el uso de simulaciones permite una mejor comprensión de cómo funciona el sistema en operación y, por otro lado, cuantificar variables como lo son los tiempos de espera en cola en lugares de carga y descarga de material. Esto último se cree es la razón por la cual las simulaciones no alcanzan los tonelajes planificados para los años analizados.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] American Smelting & Refining Co. (2016). *Norma ASARCO*. Retrieved from <https://documents.tips/documents/38663365-norma-asarco.html>
- [2] Banks, J. (1999). Discrete Event Simulation. *Winter Simulation Conference*.
- [3] Bellamy, D., & Pavrika, L. (2010). Assessing the Impact of Driverless Haul Trucks in Australian Surface Mining. *Elsevier Ltd*.
- [4] BHP. (2012). *Manual de diseño, construcción, mantención de caminos mineros y señalética minera*. Antofagasta.
- [5] Brundrett, S. (2014). Industry Analysis of Autonomous Mine Haul Truck Commercialization. *Simon Fraser University*.
- [6] Cochilco. (2016). *Seguimiento a los costos de la gran minería del cobre al 2015*. Santiago.
- [7] División Gabriela Mistral. (2016, Junio 15). Más de 9 mil Horas de Vida Útil Promedio Tienen Neumáticos de Camiones Autónomos de Codelco Gabriela Mistral. *Codelco Noticias* ([www.codelco.com](http://www.codelco.com)).
- [8] Fisher, B., & Schnittger, S. (2012). *Autonomous and Remote Operation Technologies in the Mining Industry*. BAEconomics.
- [9] García E., García H. & Cárdenas L. (2006). *Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel*.
- [10] Haultrax. (2017). *Estudio Conceptual de la Implementación de un Sistema de Camiones Autónomos en Distrito Minera Escondida*. Antofagasta.
- [11] Hitachi Construction Machinery. (2015). Hitachi to Develop Autonomous Haulage System. *Hitachi News*.
- [12] IM: International Mining. (2017, Diciembre 20). Liebherr Advancing its Autonomous Truck Development. *IM: International Mining*.
- [13] IM: International Mining. (2017, Noviembre 1). Liebherr Autonomous Trucks to Adopt ASI's MOBIUS Platform. *IM: International Mining*.
- [14] Magri, J. (2014). Efectos Incorporación de Tecnologías Autónomas en el Diseño y Planificación Minera.
- [15] Minería Chilena. (2014, Enero 28). Camiones Autónomos en Gaby: Productividad Aumentó en 25%. *Minería Chilena*.
- [16] Parreira, J. (2012). Simulation of an Open Pit Mine to Study Autonomous Haulage Trucks. *The University of British Columbia*.

- [17] Parreira, J. (2010). Autonomous vs Manual Haulage Trucks - How Mine Simulation Contributes to Future Haulage System Developments. *The University of British Columbia*.
- [18] Parreira, J. (2013). An Interactive Simulation Model to Compare an Autonomous Haulage Truck System with a Manually-Operated System. *The University of British Columbia*.
- [19] Portal Minero. (2013, Julio 26). Camiones Autónomos de Mina Gaby Alcanzan 85% de Utilización Efectiva. *Portal Minero*.
- [20] Río Tinto. (2011). The Future of Automation, Technologies in the Australian Resources Industry. *Australasian Mining Review*.
- [21] Río Tinto. (2016). *Driving Productivity in the Pilbara*. Retrieved from Río Tinto Website: [http://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130\\_18328.aspx](http://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_18328.aspx)
- [22] Wallbank, P. (2017). Caterpillar's Driverless Dumpsters Drive Disruption in Australian Mines. *diginomica*.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Modelo de simulación (Tesis Doctoral de Juliana Parreira, 2013)

El modelo de simulación propuesto fue desarrollado en *University of British Columbia* (UBC), para comparar sistemas de transporte por camiones autónomos frente a camiones manuales. Para realizar las analogías se utilizaron *Key Performance Indicators* (KPI) respecto a la seguridad, productividad, tiempos y momentos de mantenimiento, consumo de combustible y neumáticos y tiempos de ciclo.

El estudio se hizo en base a información de una faena minera que explota un depósito por medio de rajo abierto, que por razones de confidencialidad no puede ser identificada (a la que se refiere como Lucy). La simulación se llevó a cabo en base a una zona de la mina en la cual trabajan 2 palas y 9 camiones CAT 793D operando en condiciones de razón estéril/mineral de 2 (3 camiones asignados a movimiento de mineral y 6 a movimiento de estéril).

El modelo considera la siguiente información:

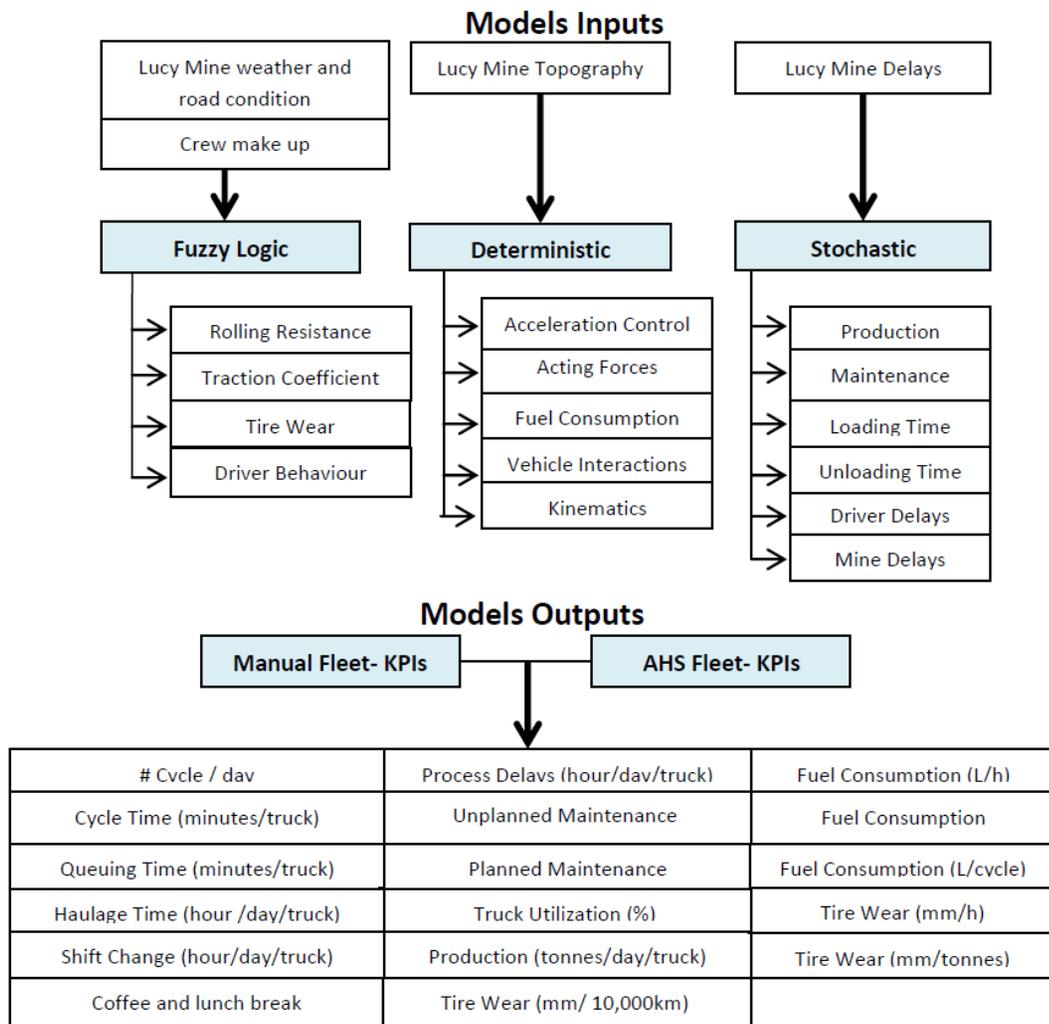


Figura N° 9-1: Variables de entrada y resultados provistos por el modelo.

Como idea general de cómo funciona el sistema se tiene un *flowchart* de flujo de información.

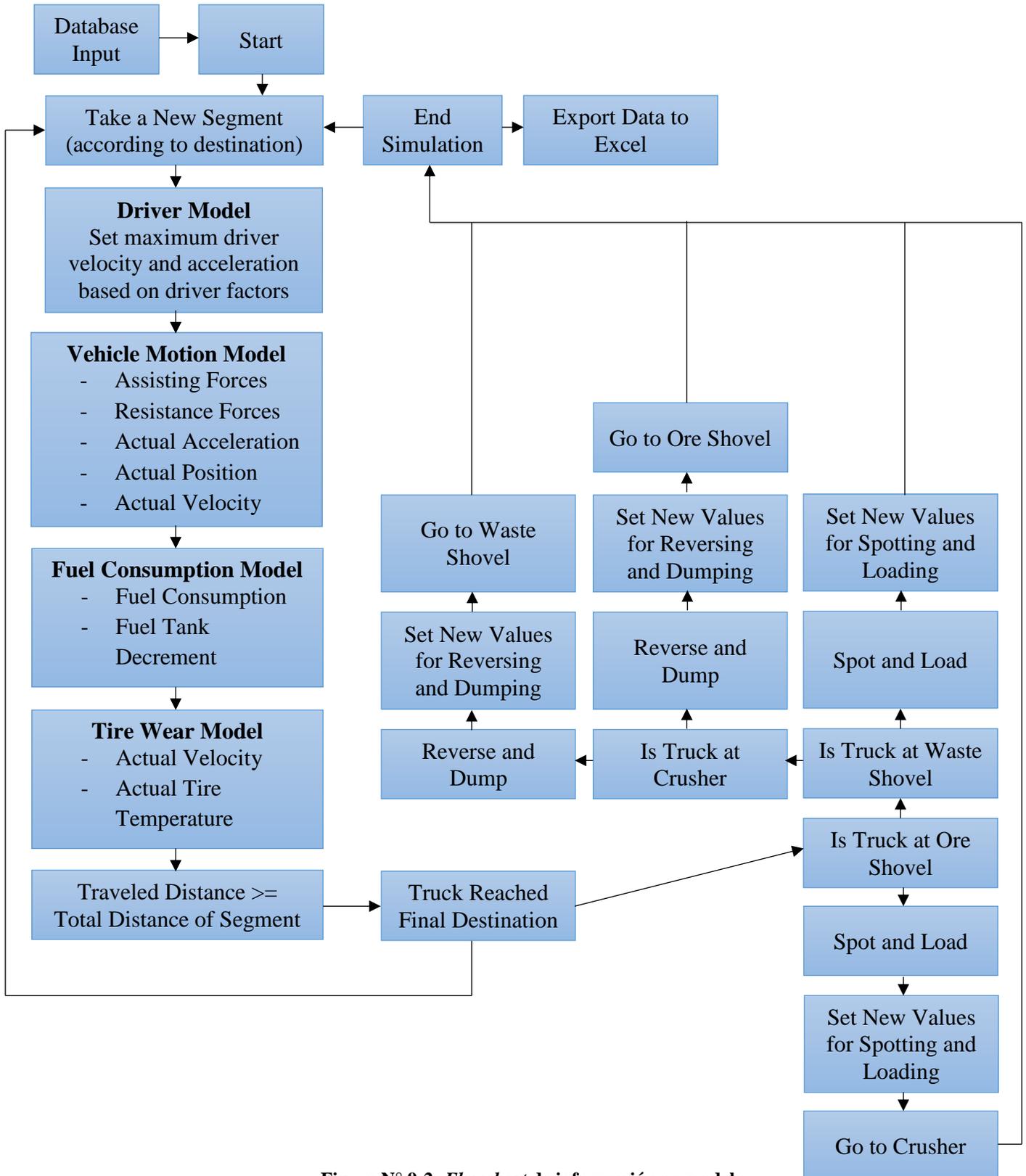


Figura N° 9-2: *Flowchart* de información en modelo.

### 9.1.1 Layout de la mina

El layout de la mina considera 8 rutas posibles:

- ❖ Ruta desde/hasta pala de mineral y chancador
- ❖ Ruta desde/hasta pala de lastre y botadero
- ❖ Ruta desde botadero hasta pala de mineral
- ❖ Ruta desde chancador a botadero
- ❖ Ruta desde/hasta pala de lastre y estacionamiento
- ❖ Ruta desde/hasta pala de mineral y estacionamiento
- ❖ Ruta desde botadero a estacionamiento
- ❖ Ruta desde chancador a estacionamiento

A continuación, se presenta un mapa en el cual se sitúa cada ruta.

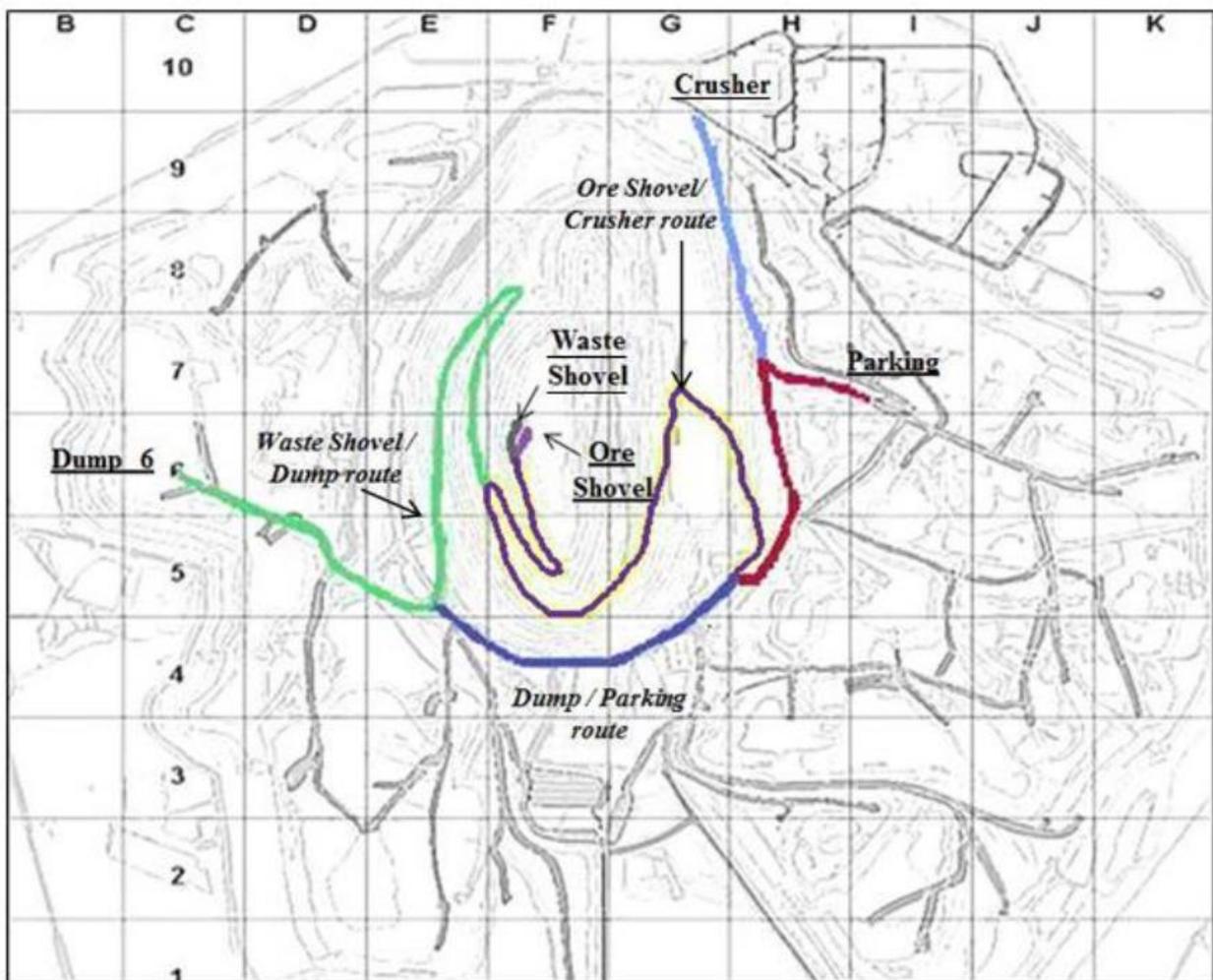


Figura N° 9-3: Rutas de transporte de mineral. Escala 500mx500m.

Las rutas están definidas por una serie de segmentos en los cuales se tienen parámetros de velocidad y pendiente de camino específicos. En general, el modelo considera que en la mina no

se tienen pendientes superiores a 10% y una velocidad máxima permitida para la ruta principal de 40 [km/h].

**Tabla N° 9-1: Número de segmentos y distancia por ruta.**

<i>Route</i>	<i>Segments</i>	<i>Total length [km]</i>
<i>Ore Shovel to Crusher</i>	21	5.7
<i>Ore Shovel to Parking</i>	14	3.5
<i>Waste Shovel to Dump</i>	15	5.8
<i>Waste Shovel to Parking</i>	20	5.4
<i>Crusher to Waste Shovel</i>	27	6.2
<i>Dump to Ore Shovel</i>	21	6.2
<i>Crusher to Parking</i>	13	3.9
<i>Dump to Parking</i>	13	3.9

## 9.2 Parámetros ingresados al modelo de (Evaluación para análisis económico del impacto de tecnologías autónomas de transporte elaborado por Haultrax)

A continuación, se presenta un resumen de diversos parámetros tomados en consideración para el cálculo del vector de camiones y la estimación de beneficios del modelo económico utilizado en el reporte elaborado por Haultrax.

**Tabla N° 9-2: Resumen de parámetros económicos tomados en consideración para análisis económico de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

<b>Parámetro</b>	<b>Equipo convencional</b>	<b>Equipo autónomo</b>
<b>Costo de adquisición de camiones [USD]</b>	5,669,000	6,883,628
<b>Vida útil de camiones [horas de motor]</b>	90,000	102,000
<b>Payload [ton]</b>	360	360
<b>Diesel [USD/lt] (convencional/autónomo)</b>		0.6
<b>Costo operadores [USD]</b>	79,767	-
<b>Factor dotacional [op/equipo]</b>	4.55	-
<b>Vida útil neumáticos [hrs/unidad]</b>	4,600	6,900
<b>Costo neumáticos [USD/unidad]</b>	44,509	44,509

**Tabla N° 9-3: Resumen de parámetros de uso del tiempo tomados en consideración para análisis económico de implementación de tecnologías autónomas elaborado por Haultrax.**

	<b>Equipo convencional</b>	<b>%</b>	<b>Equipo autónomo</b>	<b>%</b>
<b>Tiempo nominal</b>	24.00	100.0	24.00	100.0
<b>Mantenimiento</b>	3.48		3.36	
<b>Disponibles</b>	20.52	85.5	20.64	86.0
<b>Reserva</b>	3.28		2.06	
<b>Operativo</b>	17.24	84	18.58	90
<b>Demoras</b>	2.59		1.67	
<b>Efectivo</b>	14.65	85	16.90	91

### 9.3 Parámetros de distribuciones de frecuencia

Una distribución de frecuencia (o probabilidad) de una variable aleatoria corresponde a una función que asigna a cada suceso una frecuencia media (o probabilidad) de que este ocurra. Normalmente se encuentran definidas sobre un conjunto de todos los sucesos (que puede estar dada por una data histórica) y cada uno de estos es el rango de valores posibles de la variable en cuestión.

A continuación, se presenta un resumen de distribuciones de frecuencia continuas más comunes:

#### 9.3.1 Distribución Uniforme

El dominio de esta distribución está definido por dos parámetros, *low* y *high*, que son sus valores mínimo y máximo. En esta distribución, todos los intervalos de igual longitud en la distribución en su rango son igualmente probables.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \sim \end{cases}$$

*NumPy: uniform(low, high, [size])*

#### 9.3.2 Distribución Normal

Definida por el promedio ( $E(x) = \mu$ ) y la desviación estándar ( $V(x) = \sigma^2$ ).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

*NumPy: normal(mean, std, [size])*

#### 9.3.3 Distribución Triangular

La distribución triangular es la distribución de probabilidad continua que tiene un valor mínimo *low*, un valor máximo *high* y una moda *mode*, de modo que la función de densidad de probabilidad es cero para los extremos (*a* y *b*), y afín entre cada extremo y la moda.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{2}{b-a} & x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \\ 0 & \sim \end{cases}$$

*NumPy: triangular(low, mode, high, [size])*

### 9.3.4 Distribución Gamma

Definida por su parámetro de forma ( $\alpha$ ) y su parámetro de escala ( $\beta$ ). Se caracteriza por tener las siguientes propiedades  $E(x) = \alpha\beta$  y  $V(x) = \alpha\beta^2$ .

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}$$

*NumPy: gamma(shape, scale, [size])*

### 9.3.5 Distribución Weibull

Definida por su parámetro de forma ( $\gamma$ ) y su parámetro de escala ( $\theta$ ).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\gamma}{\theta} x^{\gamma-1} e^{-x^\gamma/\theta} & a \leq x \leq b \\ 0 & \sim \end{cases}$$

*NumPy: weibull(shape, [size])*

## 9.4 Plan de producción

### 9.4.1 FY 2024

**Tabla N° 9-4: Plan de producción planificado diario FY 2024.**

Equipo de Carguío	Orígen	Destino	Tonelaje objetivo [kt]	Prioridad
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	Ch_3	40.88	3
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	Sm13080e	3.15	1
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	sxlx_1-1	0.63	2
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	Sm23070e	3.74	1
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	Sm53070e	0.01	1
BUCYRUS_495HR_1	E6_L_2545_e	Ch_2	32.52	3
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Ch_2	9.57	3
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	001_3090_cml	1.60	0
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	001_long_term_s01-1	3.67	0
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Sm13080e	9.92	1
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	sxlx_1-2	39.20	2
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Sm23070e	0.10	1
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Sm43070e	19.34	1
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Sm53070e	0.03	1
BUCYRUS_495HR_2	E7_L_2665_e	Ch_3	12.04	3
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2965_e	001_long_term_s01-2	95.46	0
BUCYRUS_495HR_4	N17_L_2980_e	001_long_term_s01-3	95.46	0
BUCYRUS_495HR_5	N17_L_2995_e	Ch_4	45.11	3
BUCYRUS_495HR_5	N17_L_2995_e	sxlx_1-1	24.00	2
BUCYRUS_495HR_5	N17_L_2995_e	Smx3125e	26.45	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	001_3085_n	12.84	0
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Ch_1	6.15	3
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Ch_5	18.38	3
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Sm13080e	0.50	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Sm23070e	1.23	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Sm43070e	2.76	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Ch_3	15.16	3
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Sm53070e	26.03	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Sox3105e	0.25	1
BUCYRUS_495HR_6	N17_L_3010_e	Ch_2	12.06	3
BUCYRUS_495HR_7	N18_L_3220_e	001_3085_n	55.03	0
BUCYRUS_495HR_7	P11_L_2635_e	001_3090_cml	13.48	0
BUCYRUS_495HR_7	P11_L_2635_e	Sm23070e	26.62	1
BUCYRUS_495HR_8	P11_L_2650_e	Ch_3	92.71	3
P&H_4100_XPB_1	P11_L_2665_e	Ch_2	73.74	3
P&H_4100_XPB_1	P11_L_2665_e	Sm13080e	21.50	1

P&H_4100_XPB_2	P11_L_2680_e	sxlx_2	51.70	2
P&H_4100_XPB_2	P11_L_2680_e	Sm43070e	16.81	1
P&H_4100_XPB_2	P11_L_2680_e	Sm53070e	5.99	1
P&H_4100_XPB_3	S4_L_3040_e	001_long_term_s01-1	95.46	0
P&H_4100_XPB_4	S4_L_3055_e	001_long_term_s01-2	20.39	0
P&H_4100_XPB_4	S4_L_3055_e	Smx3125e	0.98	1
P&H_4100_XPB_4	S4_L_3055_e	Sox3105e	0.21	1
P&H_4100_XPB_4	S4_L_3055_e	Ch_4	2.15	3
P&H_4100_XPB_4	Sob3150e	Ch_4	12.49	3
P&H_4100_XPB_5	N11_L_3380_n	000_long_term_n03	85.36	0
P&H_4100_XPC_1	N11_L_3395_n	000_long_term_n02	85.36	0
P&H_4100_XPC_2	N10_L_2930_n	Ch_5	57.10	3
P&H_4100_XPC_2	N10_L_2930_n	000_3240lt_ne	10.76	0
P&H_4100_XPC_2	N10_L_2930_n	000_3305lt_n	10.15	0
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	sxlx_3	13.86	2
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	Sm13110n	17.97	1
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	Sm23125n	1.96	1
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	Sm43280n	7.37	1
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	Sm53280n	0.28	1
P&H_4100_XPC_3	N10_L_2945_n	Ch_4	0.01	3
P&H_4100_XPC_3	N09_L_2675_n	Sm13110n	10.47	1
P&H_4100_XPC_3	N09_L_2675_n	Sm23125n	7.55	1
P&H_4100_XPC_3	N09_L_2675_n	Sm53280n	0.69	1
P&H_4100_XPC_3	N09_L_2675_n	Ch_5	25.04	3

## 9.4.2 FY 2025

Tabla N° 9-5: Plan de producción planificado diario FY 2025.

Equipo de Carguío	Origen	Destino	Tonelaje objetivo [kt]	Prioridad
BUCYRUS_495HR_1	P11_L_2590_e	Ch_3	86.16	3
BUCYRUS_495HR_1	P11_L_2590_e	Sm43070e	9.86	1
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	Ch_2	68.54	3
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	001_3090_cm1	4.06	0
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	sxlx_1-1	8.86	2
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	Sm23070e_D	0.03	1
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	Sm53070e	0.60	1
BUCYRUS_495HR_2	P11_L_2605_e	Ch_5	12.28	3
BUCYRUS_495HR_3	S4_L_2935_e	001_long_term_s01-1	95.20	0
BUCYRUS_495HR_4	S4_L_2950_e	001_long_term_s01-2	95.20	0
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	001_3090_cm1	43.97	0
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	sxlx_1-1	9.43	2
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	Sm43070e	0.74	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	Sm53070e	11.27	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	Smx3125e	1.08	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	Sox3105e	0.03	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2965_e	Ch_4	28.68	3
BUCYRUS_495HR_6	S4_L_2980_e	001_long_term_s01-1	68.70	0
BUCYRUS_495HR_6	S4_L_2980_e	Ch_2	7.01	3
BUCYRUS_495HR_6	E6_L_2485_e	Ch_3	9.81	3
BUCYRUS_495HR_6	E7_L_2590_e	Ch_2	9.22	3
BUCYRUS_495HR_6	E7_L_2590_e	sxlx_1-1	0.42	2
BUCYRUS_495HR_6	E7_L_2590_e	Sm43070e	0.05	1
BUCYRUS_495HR_7	N17_L_2890_e	001_long_term_s01-3	95.20	0
BUCYRUS_495HR_8	N17_L_2905_e	Bot_e_3250	53.32	0
BUCYRUS_495HR_8	N17_L_2905_e	Ch_4	14.54	3
BUCYRUS_495HR_8	N17_L_2905_e	sxlx_1-2	22.62	2
BUCYRUS_495HR_8	N17_L_2905_e	Sm43070e	4.39	1
BUCYRUS_495HR_8	N17_L_2905_e	Smx3125e	0.60	1
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2920_e	001_long_term_s01-2	12.48	0
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2920_e	Sm53070e	25.40	1
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2920_e	Ch_4	9.95	3
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2920_e	Ch_2	47.47	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2935_e	Ch_1	6.13	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2935_e	001_3090_cm1	5.27	0
P&H_4100_XPB_2	N18_L_3175_e	Bot_e_3250	22.78	0
P&H_4100_XPB_2	N18_L_3175_e	001_long_term_s01-3	0.90	0
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2935_e	Ch_3	59.68	3
P&H_4100_XPB_2	N18_L_3175_e	Ch_4	0.04	3

<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N18_L_3160_e	Bot_e_3250	95.20	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	Ch_5	84.55	3
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	000_3240lt_ne	1.29	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	000_3305lt_n	1.11	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	sxlx_3	2.88	2
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	Sm13110n	0.28	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	Sm23125n	0.81	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	Sm43080n	3.29	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	N10_L_3855_n	Sm53080n	0.98	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_5</b>	N11_L_3260_n	000_long_term_n02	95.20	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	000_long_term_n02	91.11	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	Ch_5	1.63	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	sxlx_3	0.80	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	Sm43080n	1.59	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	Sm53080n	0.07	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N11_L_3275_n	Smx3150_D	0.00	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	Smx3150n_L	Ch_4	3.23	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	Sob3125n	Ch_4	0.02	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Sm13080e	sxlx_2	4.88	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Sm23070e_L	sxlx_2	0.05	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Smx3140e	Ch_4	8.54	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Sob3150e	Ch_4	0.45	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Sod3140e	Ch_4	8.69	3

### 9.4.3 FY 2026

Tabla N° 9-6: Plan de producción planificado diario FY 2026.

Equipo de Carguío	Origen	Destino	Tonelaje objetivo [kt]	Prioridad
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	Ch_5	11.69	3
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	001_3090_cm1	18.00	0
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	001_long_term_s01	43.64	0
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	sxlx_2	18.59	2
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	Sm43070e	2.92	1
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2845_e	Smx3125e	0.47	1
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2860_e	Ch_2	33.49	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2860_e	Ch_1	6.13	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2860_e	Ch_4	1.08	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2860_e	Sm53070e	12.28	1
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2860_e	Ch_3	42.10	3
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3085_e	Bot_e_3250	95.89	0
P&H_4100_XPB_4	N18_L_3100_e	Bot_e_3250	64.49	0
P&H_4100_XPB_4	N18_L_3100_e	001_3085_n	0.47	0
P&H_4100_XPB_4	N18_L_3100_e	Ch_4	22.00	3
P&H_4100_XPB_4	N18_L_3100_e	Sm53070e	0.13	1
P&H_4100_XPB_4	N18_L_3100_e	Smx3125e	7.42	1
P&H_4100_XPB_5	Pl1_L_2530_e	Ch_3	82.08	3
P&H_4100_XPB_5	Pl1_L_2530_e	001_3090_cm1	6.04	0
P&H_4100_XPB_5	Pl1_L_2530_e	Sm43080n	7.17	1
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2545_e	Ch_2	65.29	3
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2545_e	sxlx_1-2	29.43	2
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2545_e	Sm53070e	0.39	1
BUCYRUS_495HR_2	En12_L_3320_n	000_long_term_ne02	93.13	0
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	sxlx_1-1	11.65	2
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	Ch_5	79.84	3
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	Sm13110n	1.31	1
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	Sm23125n	0.61	1
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	Sm43080n	0.22	1
BUCYRUS_495HR_3	N10_L_2780_n	Sm53080n	1.56	1
BUCYRUS_495HR_4	N11_L_3155_n	000_3305lt_n	95.89	0
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	000_3305lt_n	21.62	0
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	000_long_term_n02	35.34	0
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	Sm43080n	9.57	1
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	sxlx_1-1	8.58	2
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	Ch_5	19.44	3
BUCYRUS_495HR_5	N11_L_3170_n	Sm23125n	0.07	0
BUCYRUS_495HR_6	Sm13080e	sxlx_2	28.74	2
BUCYRUS_495HR_6	Sm13125n	sxlx_3	9.12	2

<b>BUCYRUS_495HR_6</b>	Sm23070e_L	sxlx_2	0.24	2
<b>BUCYRUS_495HR_7</b>	Smx3140e	Ch_4	24.00	3
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	S4_L_2830_e	001_3090_cml	95.89	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	S4_L_2845_e	Ch_3	36.17	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	S4_L_2845_e	001_3090_cml	1.77	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	S4_L_2845_e	001_long_term_s01	22.84	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	S4_L_2845_e	Ch_4	6.33	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	S4_L_2845_e	Ch_2	28.77	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	S4_L_2860_e	sxlx_1-2	95.89	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	Ch_4	6.18	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	sxlx_2	4.41	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	Sm23070e_D	0.00	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	Sm43070e	17.58	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	Sm53070e	64.70	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	S4_L_2875_e	Smx3125e	0.25	1

#### 9.4.4 FY 2027

Tabla N° 9-7: Plan de producción planificado diario FY 2027.

Equipo de Carguío	Origen	Destino	Tonelaje objetivo [kt]	Prioridad
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2800_e	Ch_2	41.55	3
P&H_4100_XPB_1	N17_L_2800_e	Ch_3	52.23	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	001_3090cm1-1	1.34	0
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	001_3110_e	36.65	0
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	Ch_1	6.13	3
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	sxlx_2	24.01	2
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	Sm23070e	0.01	1
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	Sm43070e	8.79	1
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	Sm53070e	19.58	1
P&H_4100_XPB_2	N17_L_2815_e	Smx3125e	0.11	1
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	Ch_4	32.32	3
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3025_e	Bot_e_3250	8.23	0
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3025_e	001_3085_n	35.83	0
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	sxlx_2	0.02	2
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	Sm43070e	0.02	1
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	Sm53070e	0.06	1
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	Smx3125e	18.66	1
P&H_4100_XPB_3	N18_L_3040_e	Sox3105n	0.04	1
P&H_4100_XPB_4	Pl1s_L_2995_e	001_3090cm1-2	95.00	0
P&H_4100_XPB_5	Pl1s_L_3010_e	001_3090cm1-3	95.00	0
BUCYRUS_495HR_1	Pl1s_L_3025_e	sxlx_2	0.01	2
BUCYRUS_495HR_1	Pl1s_L_3025_e	Sm43070e	0.04	1
BUCYRUS_495HR_1	Pl1s_L_3025_e	001_3090cm1-1	39.79	0
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	001_3090cm1-2	0.25	0
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	sxlx_2	1.47	2
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	Sm43070e	0.23	1
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	Sm53070e	0.18	1
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	Ch_2	13.13	3
BUCYRUS_495HR_1	Pl1_L_2515_e	Ch_3	16.50	3
BUCYRUS_495HR_2	S4_L_2740_e	sxlx_1-2	94.98	2
BUCYRUS_495HR_3	S4_L_2755_e	Ch_3	69.33	3
BUCYRUS_495HR_3	S4_L_2755_e	001_3090cm1-3	16.45	0
BUCYRUS_495HR_4	S4_L_2770_e	001_3090cm1-1	30.63	0
BUCYRUS_495HR_4	S4_L_2770_e	Ch_2	55.15	3
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2785_e	Sm13080e	0.77	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2785_e	Sm23070e	1.12	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2785_e	Sm43070e	10.03	1
BUCYRUS_495HR_5	S4_L_2785_e	Sm53070e	31.13	1
BUCYRUS_495HR_5	Smx3140e	Ch_4	26.62	3

<b>BUCYRUS_495HR_6</b>	En12_L_3380_n	000_long_term_ne02-1	87.88	0
<b>BUCYRUS_495HR_7</b>	En12_L_3365_n	000_long_term_ne02-2	95.00	0
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	000_long_term_ne02-3	13.49	0
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	sxlx_3	0.19	2
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	Sm43080n	0.09	1
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	Smx3150n	0.28	1
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	Sox3105n	0.07	1
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En13_L_3365_n	000_long_term_n02	35.44	0
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	Ch_5	5.10	3
<b>BUCYRUS_495HR_8</b>	En12_L_3395_n	Ch_4	0.66	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N10_L_2690_n	Ch_5	63.87	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N10_L_2660_n	sxlx_1-1	17.35	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N10_L_2660_n	Sm13110n	0.37	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N10_L_2660_n	Sm23125n	0.96	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	N10_L_2660_n	Sm53080n	0.32	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	N11_L_3065_n	000_3305lt_n	64.65	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	N11_L_3065_n	Sm43080n	21.59	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	sxlx_3	17.36	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	Sm13110n	0.00	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	Smx3150n	0.13	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	Sm13125n	sxlx_3	6.57	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	Ch_5	50.12	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	Ch_2	0.48	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_3</b>	N11_L_3080_n	Ch_3	0.598771913	0

## 9.4.5 FY 2028

Tabla N° 9-8: Plan de producción planificado diario FY 2028.

Equipo de Carguío	Origen	Destino	Tonelaje objetivo [kt]	Prioridad
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	001_3085_n	4.66	0
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	001_long_term_s01	30.71	0
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Ch_4	30.41	3
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	sxlx_1-1	2.36	2
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Sm43070e	0.17	1
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Sm53070e	0.66	1
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Smx3125e	23.94	1
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Sox3105e	0.11	1
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Ch_2	1.08	3
BUCYRUS_495HR_1	N18_L_2995_e	Ch_3	1.36	3
BUCYRUS_495HR_2	N17_L_2725_e	Ch_3	32.51	3
BUCYRUS_495HR_2	N17_L_2725_e	Sm43070e	5.83	1
BUCYRUS_495HR_2	N17_L_2725_e	Sm53070e	30.81	1
BUCYRUS_495HR_2	N17_L_2725_e	Ch_2	25.86	3
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2740_e	Sm43070e	8.73	1
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2740_e	001_3110_e	73.56	0
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2740_e	sxlx_1-2	10.91	2
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2740_e	Sm13080e	2.32	1
BUCYRUS_495HR_3	N17_L_2740_e	Sm23070e	0.40	1
BUCYRUS_495HR_4	P11s_2875_e	001_3090_cml	94.97	0
BUCYRUS_495HR_5	P11s_2890_e	001_3090_cml	94.97	0
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Ch_1	6.15	3
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Ch_2	19.85	3
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Ch_3	24.95	3
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	sxlx_2	16.23	2
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Sm13080e	2.14	1
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Sm43070e	23.90	1
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Sm53070e	2.81	1
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Smx3125e	0.28	1
BUCYRUS_495HR_6	P11s_2905_e	Ch_4	0.13	3
BUCYRUS_495HR_7	S4_L_2680_e	Ch_3	93.25	3
BUCYRUS_495HR_7	S4_L_2680_e	Sm13080e	1.95	1
BUCYRUS_495HR_8	S4_L_2695_e	Sm13080e	20.93	1
BUCYRUS_495HR_8	S4_L_2695_e	Ch_2	74.18	3
P&H_4100_XPB_1	S4_L_2710_e	001_3085_n	34.93	0
P&H_4100_XPB_1	S4_L_2710_e	sxlx_1-1	0.58	2
P&H_4100_XPB_1	S4_L_2710_e	Sm23070e	43.65	1
P&H_4100_XPB_1	S4_L_2710_e	Sm43070e	5.33	1
P&H_4100_XPB_1	S4_L_2710_e	Sm53070e	11.59	1

<b>P&amp;H_4100_XPB_2</b>	En13_L_3290_n	000_long_term_n02	95.28	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_2</b>	En13_L_3290_n	Sm43080n	0.18	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	Ch_5	58.60	3
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	000_3305lt_n	4.44	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	000_long_term_ne02-1	4.92	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	sxlx_3	3.16	2
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	Sm13110n	13.66	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	Sm43080n	10.29	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_3</b>	N11_L_2990_n	Sm53080n	0.40	1
<b>P&amp;H_4100_XPB_4</b>	En12_L_3140_n	000_long_term_ne02-2	95.46	0
<b>P&amp;H_4100_XPB_5</b>	En12_L_3155_n	000_long_term_ne02-3	95.46	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	000_3305lt_n	33.59	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	000_long_term_ne02-1	30.32	0
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	sxlx_3	2.06	2
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	Sm13110n	0.84	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	Sm43080n	2.79	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	Smx3150n	0.07	1
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	Ch_5	23.50	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_1</b>	En12_L_3185_n	Ch_4	2.28	3
<b>P&amp;H_4100_XPC_2</b>	Smx3140e	Ch_4	26.94	3

## 9.5 Topografías por año simulado

### 9.5.1 FY 2024

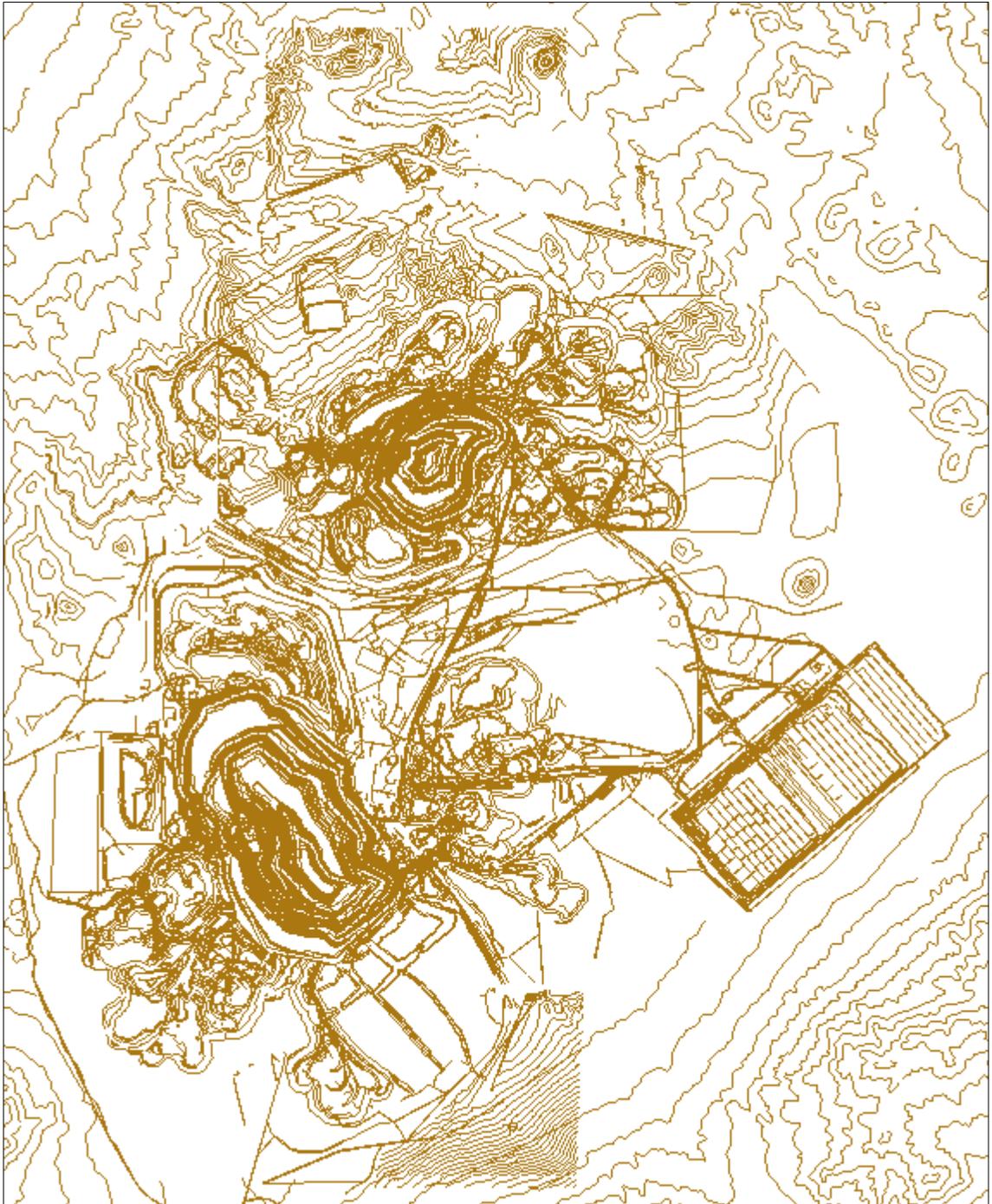


Figura N° 9-4: Topografía FY 2024.

9.5.2 FY 2025

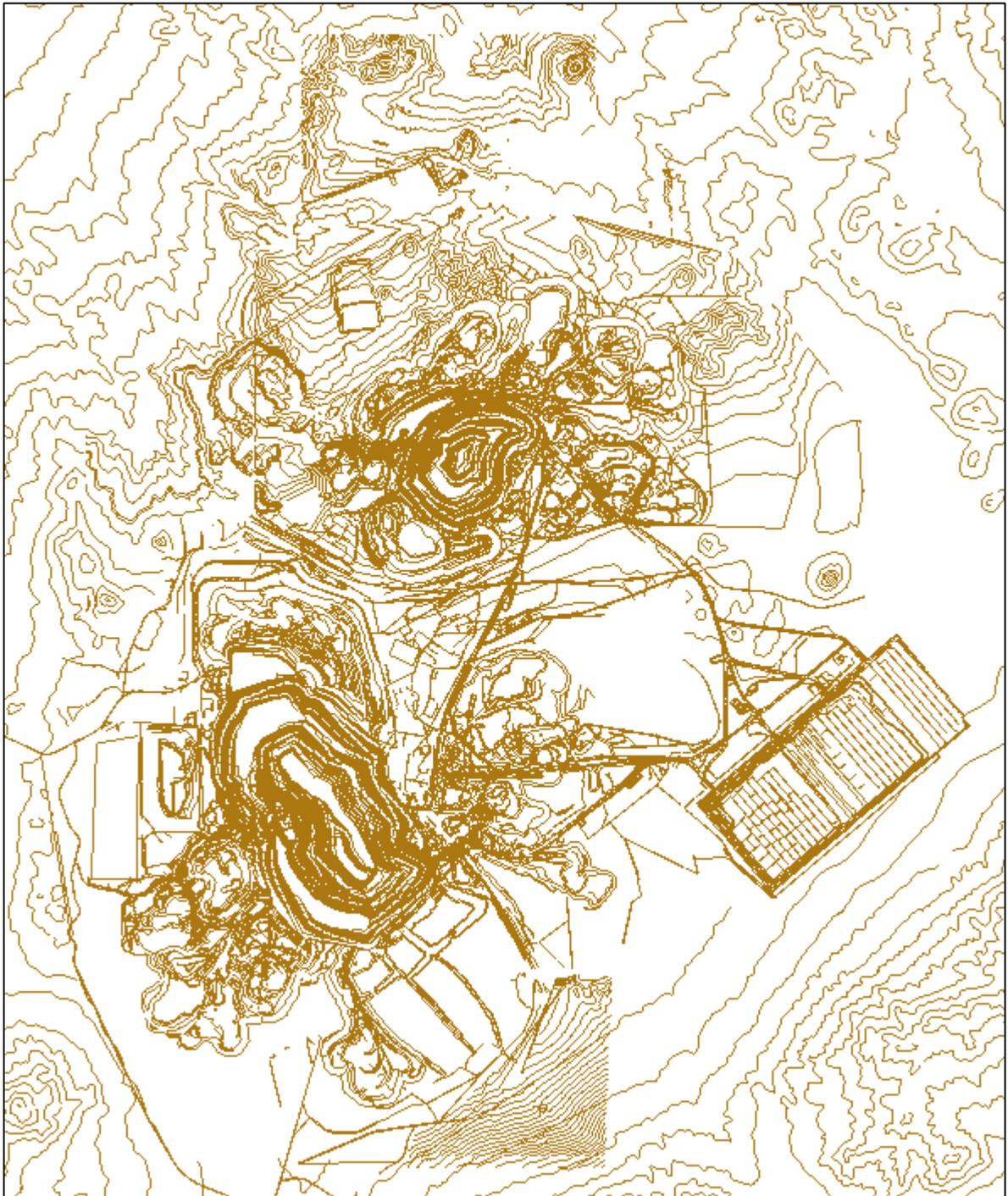


Figura N° 9-5: Topografía FY 2025.

9.5.3 FY 2026

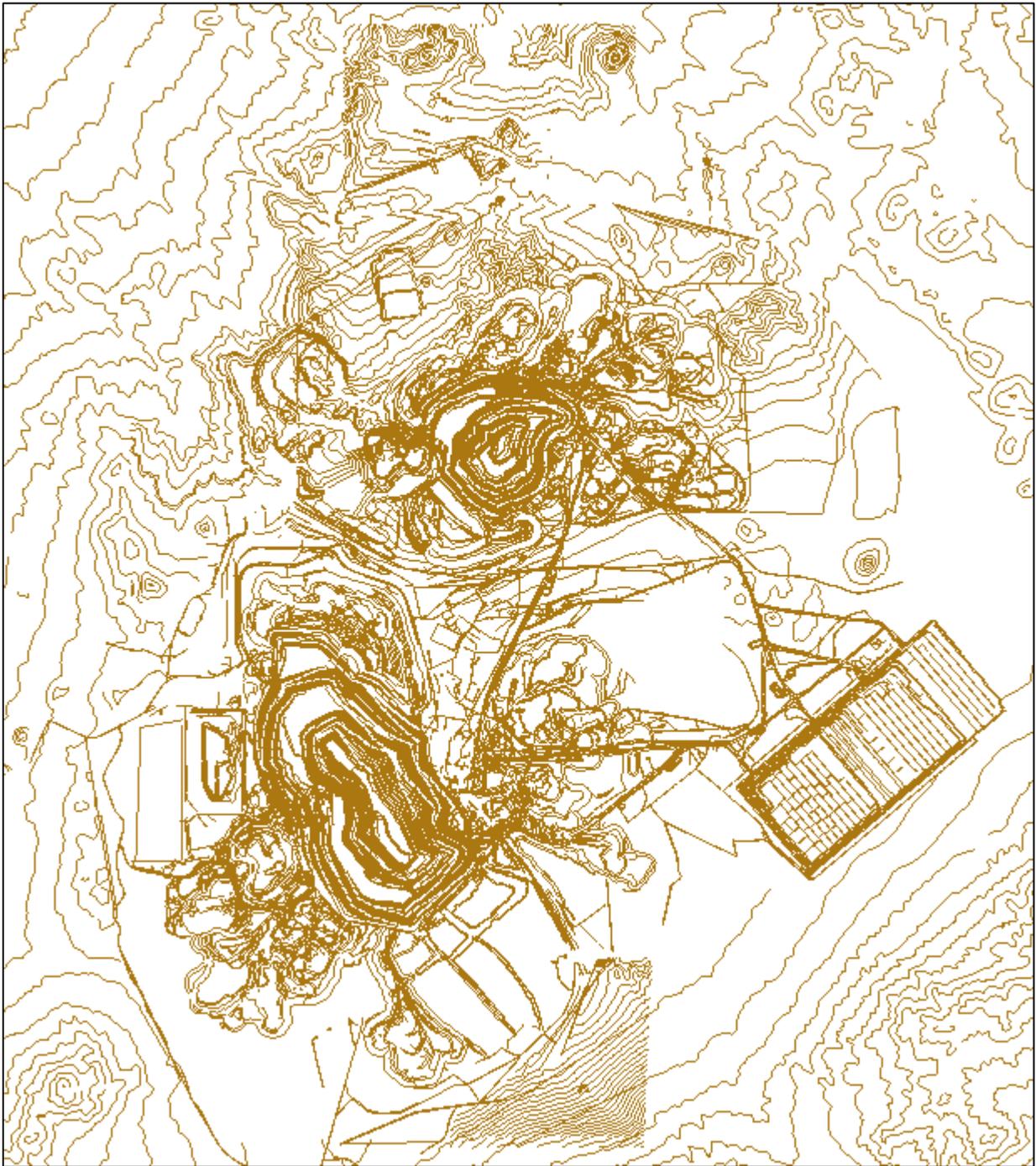


Figura N° 9-6: Topografía FY 2026.

9.5.4 FY 2027

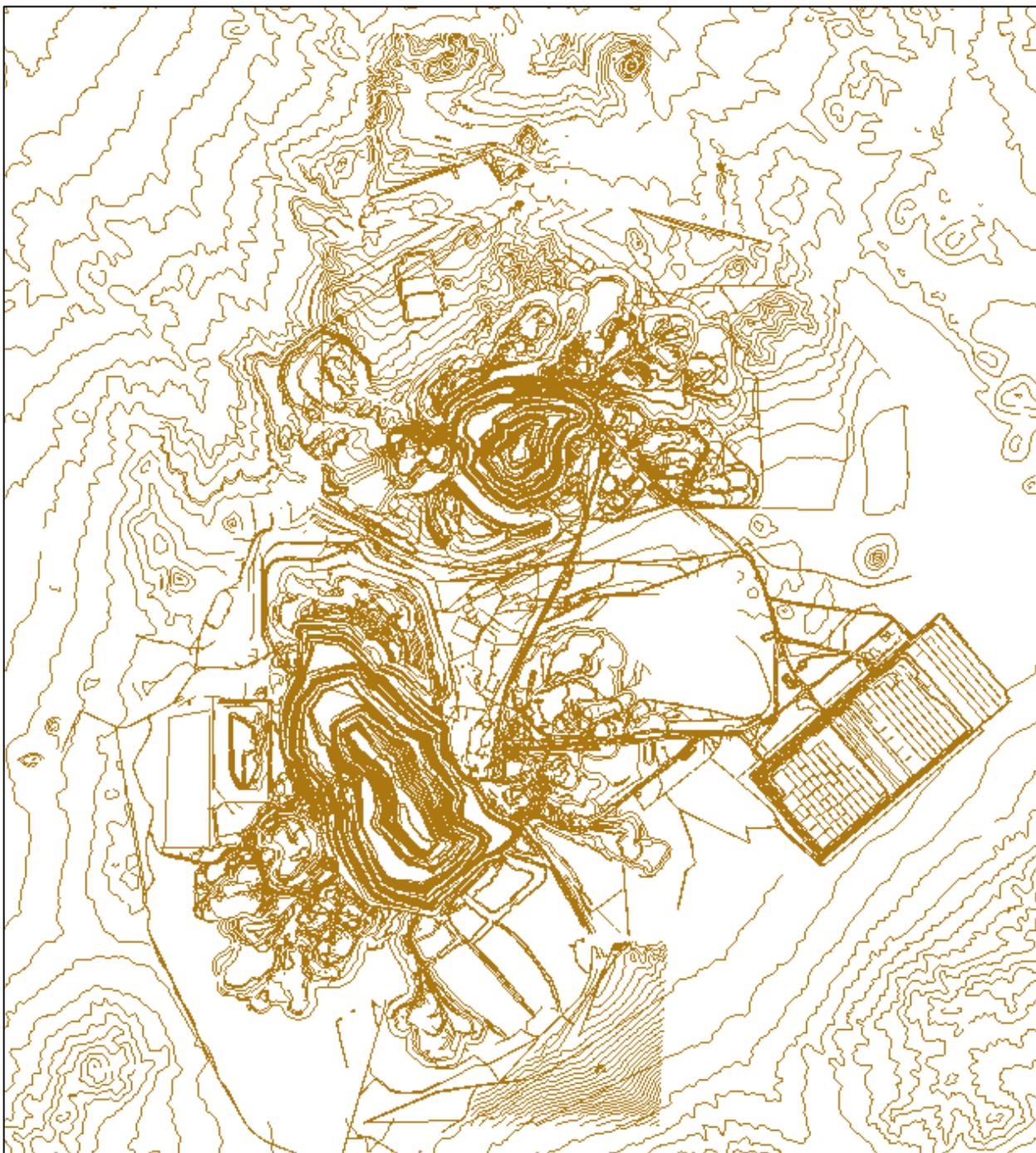


Figura N° 9-7: Topografía FY 2027.

9.5.5 FY 2028

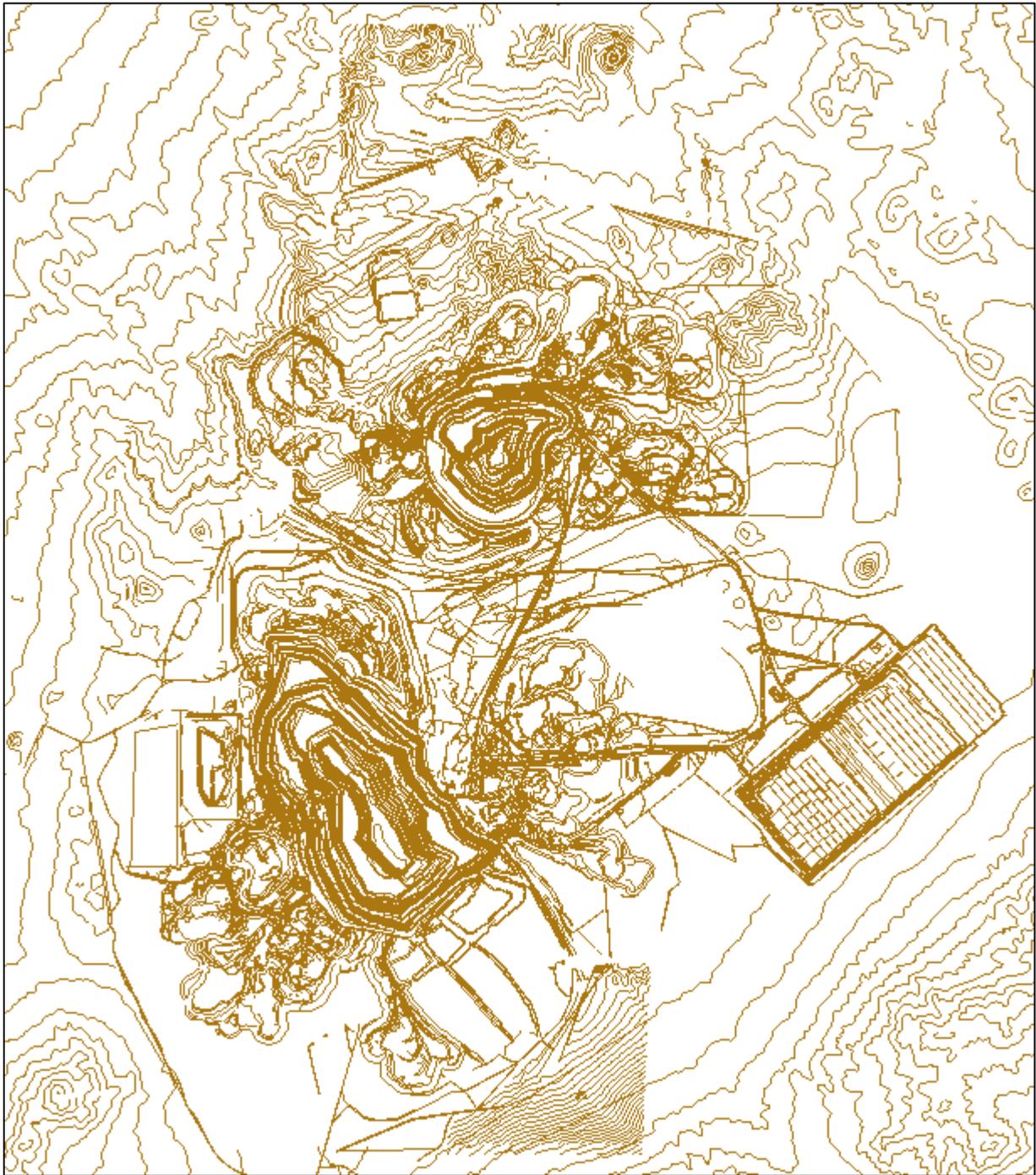


Figura N° 9-8: Topografía FY 2028.

## 9.6 Rutas por año simulado

### 9.6.1 Casos Base

#### 9.6.1.1 FY 2024

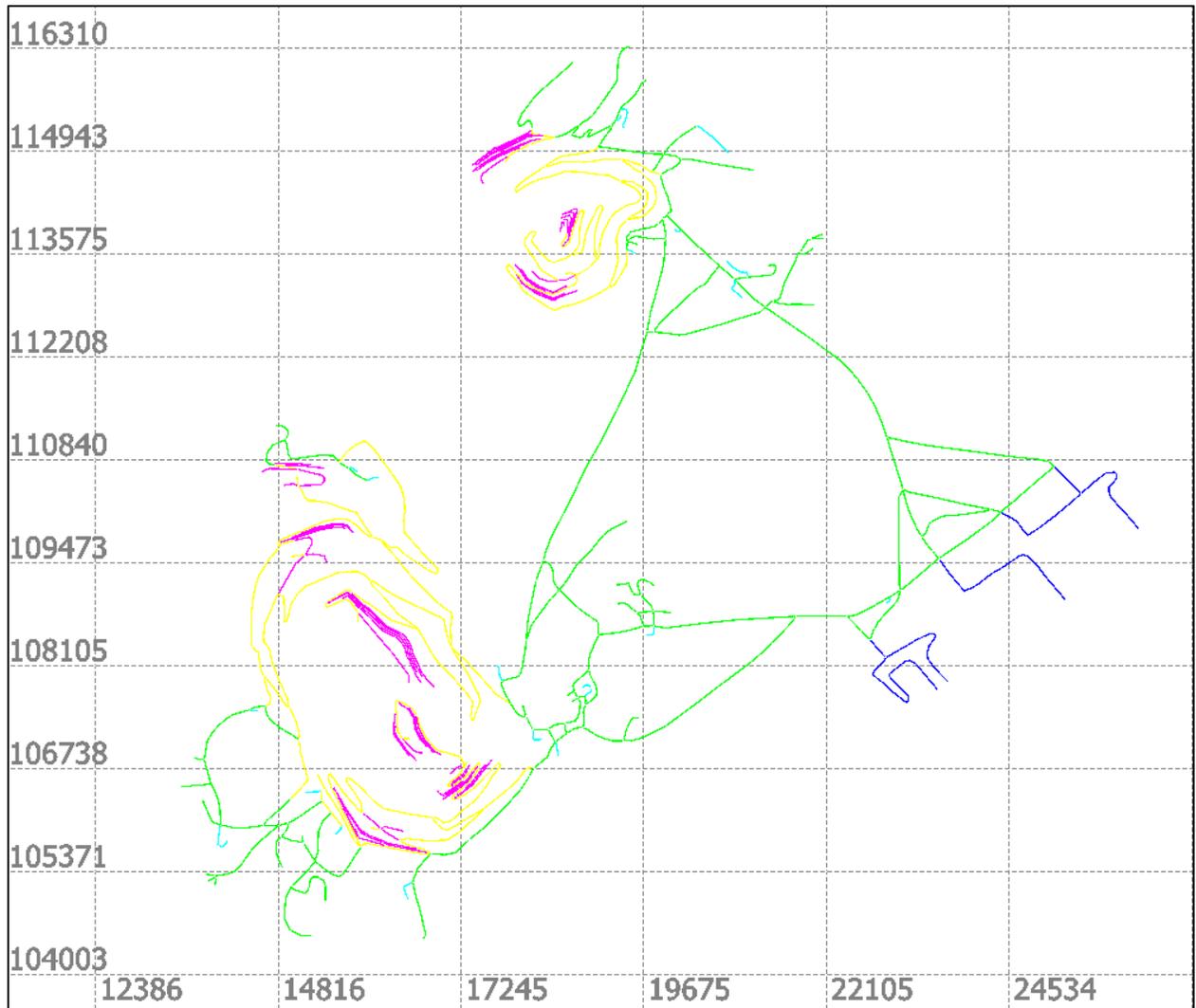


Figura N° 9-9: Rutas FY 2024.

9.6.1.2 FY 2025

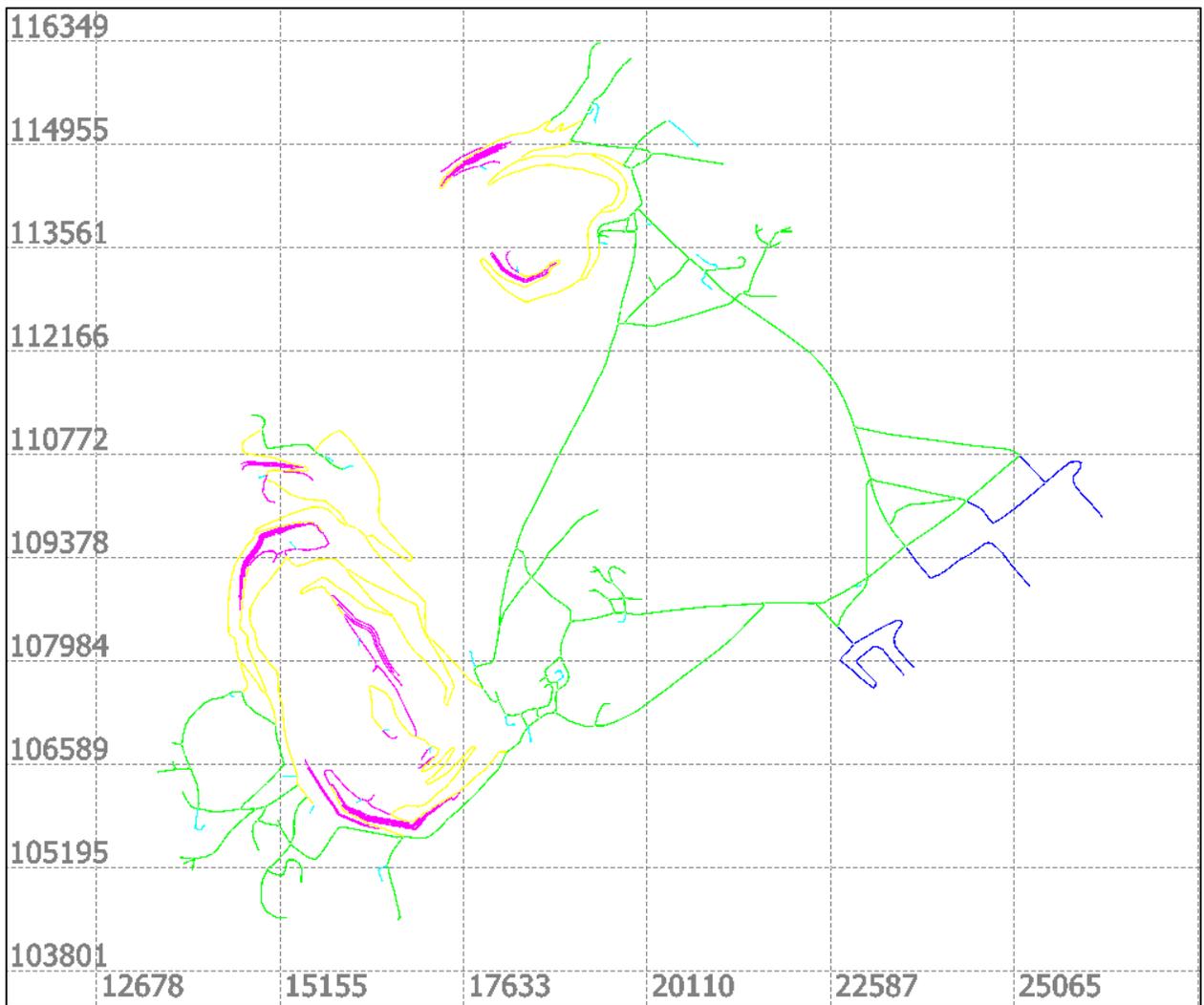


Figura N° 9-10: Rutas FY 2025.

9.6.1.3 FY 2026

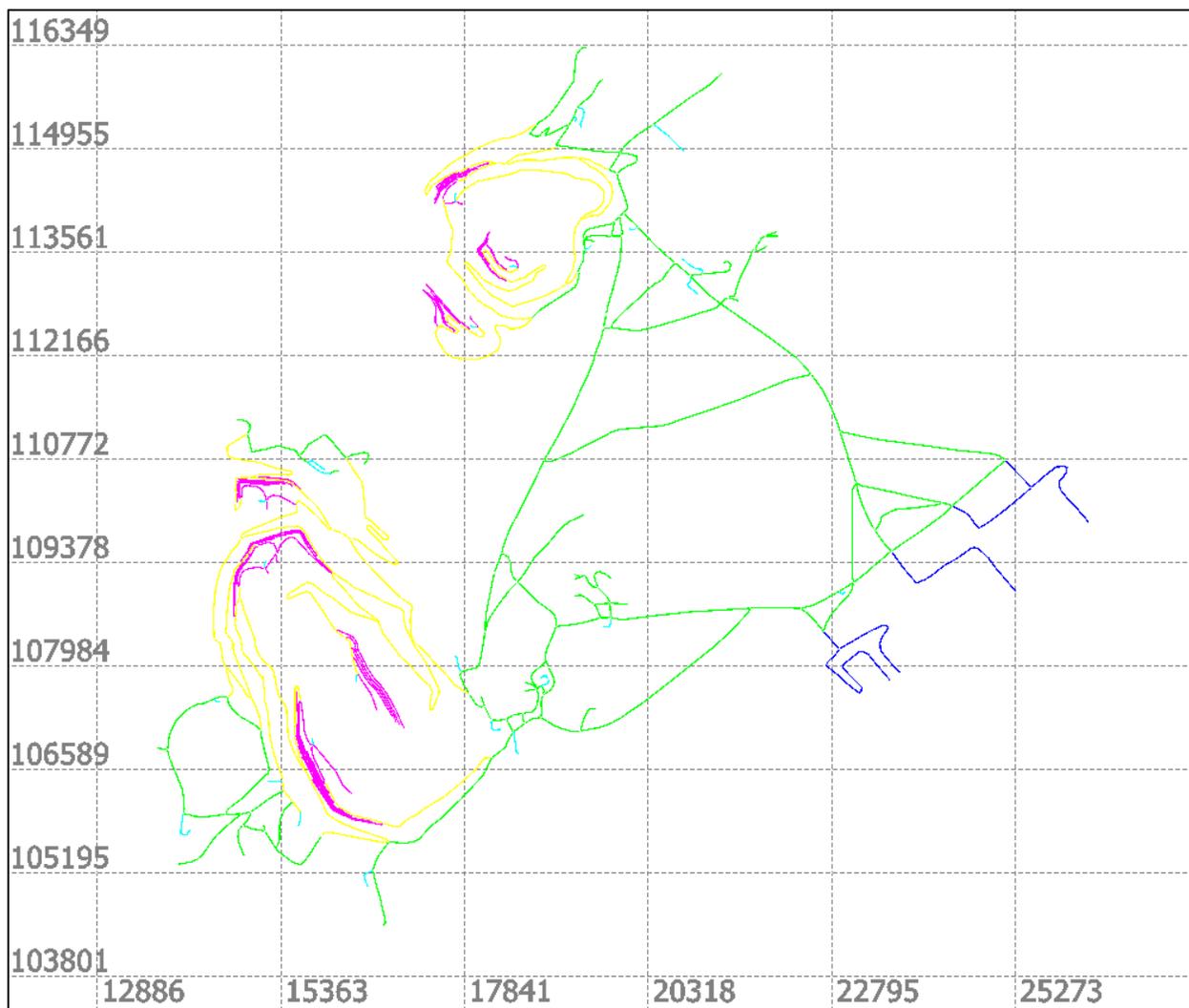


Figura N° 9-11: Rutas FY 2026.

9.6.1.4 FY 2027

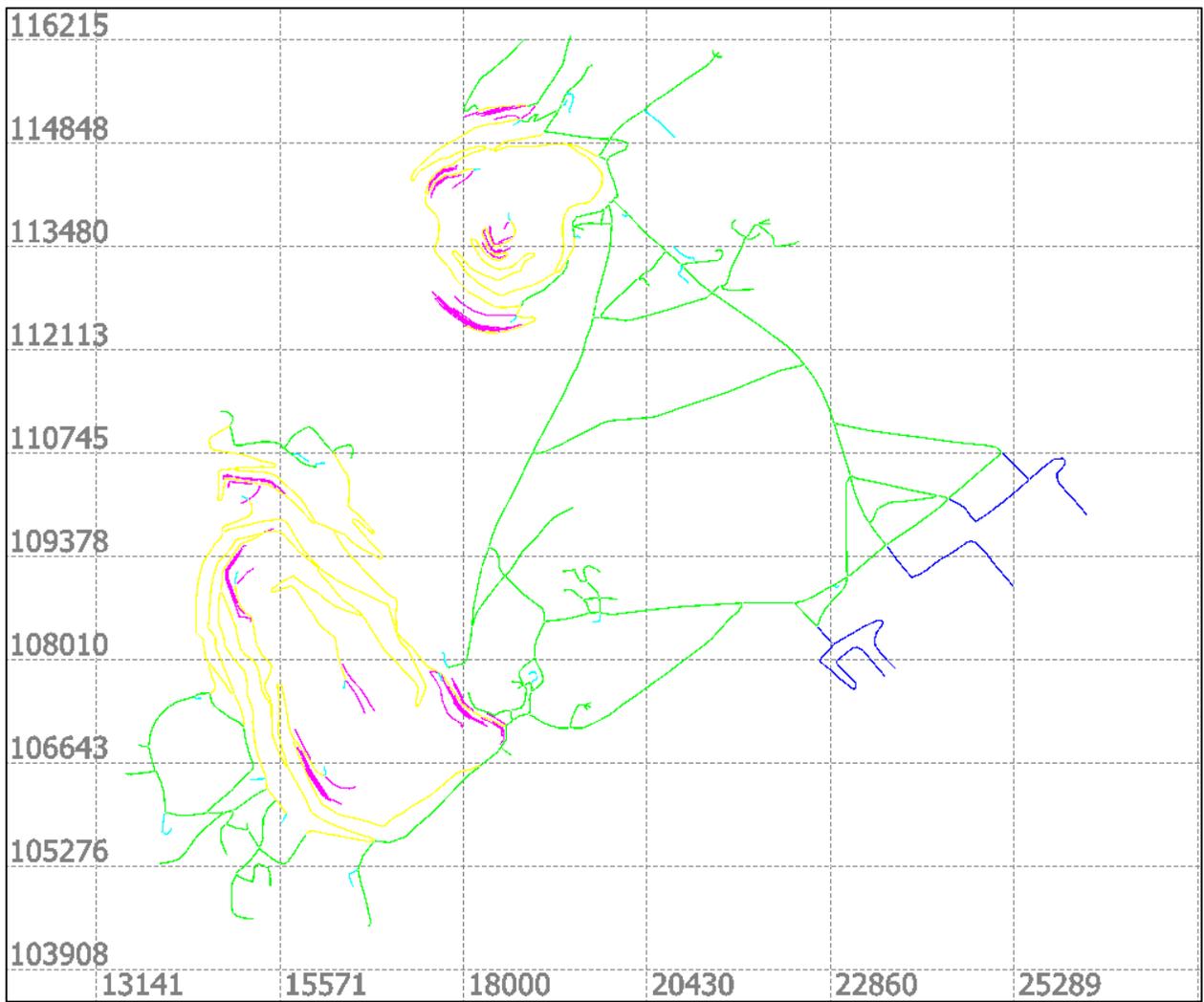


Figura N° 9-12: Rutas FY 2027.

9.6.1.5 FY 2028

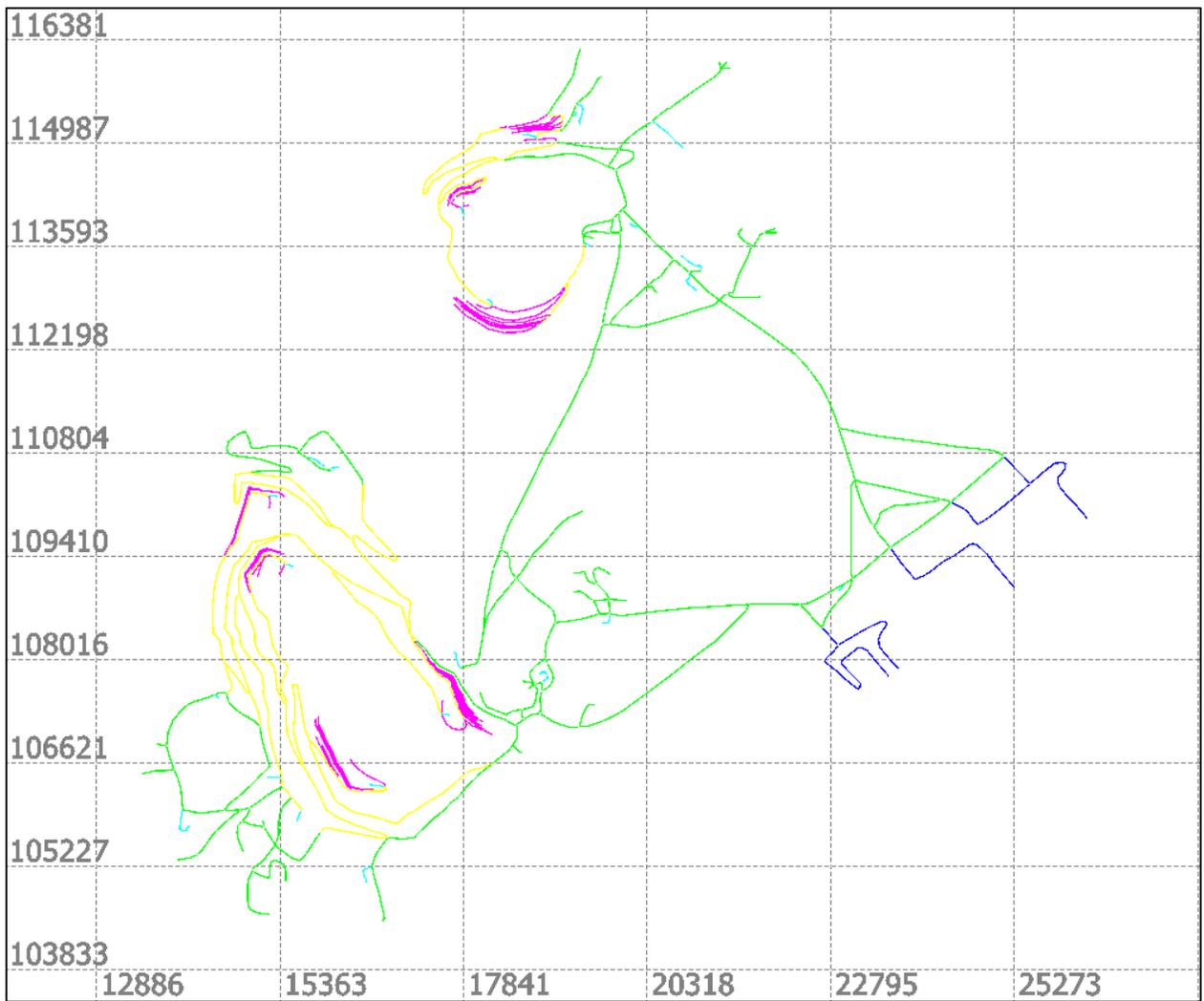


Figura N° 9-13: Rutas FY 2028.

## 9.6.2 Casos con proyecto

### 9.6.2.1 FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

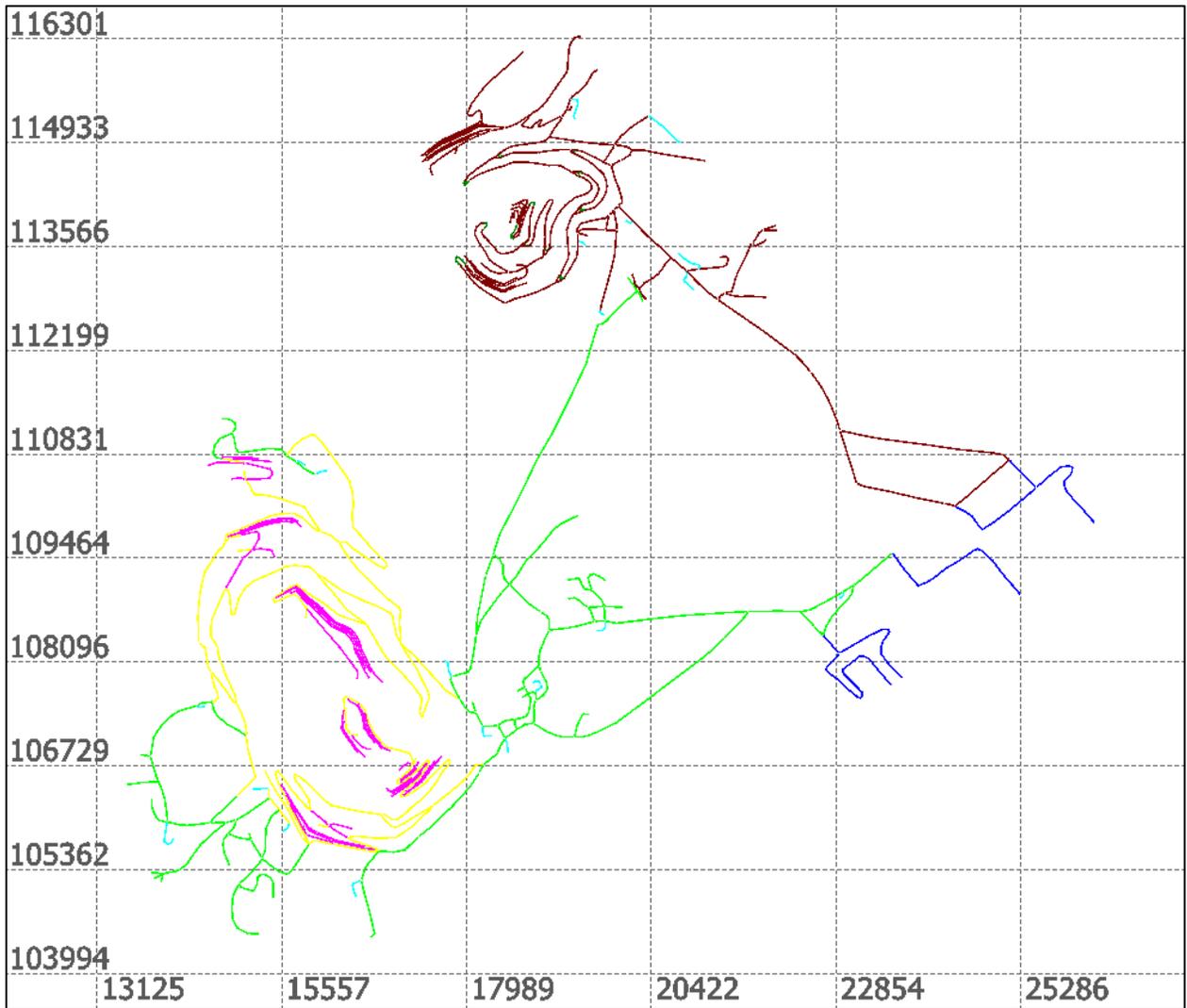


Figura N° 9-14: Rutas en caso Escondida Norte autónoma, FY 2024.

9.6.2.2 FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

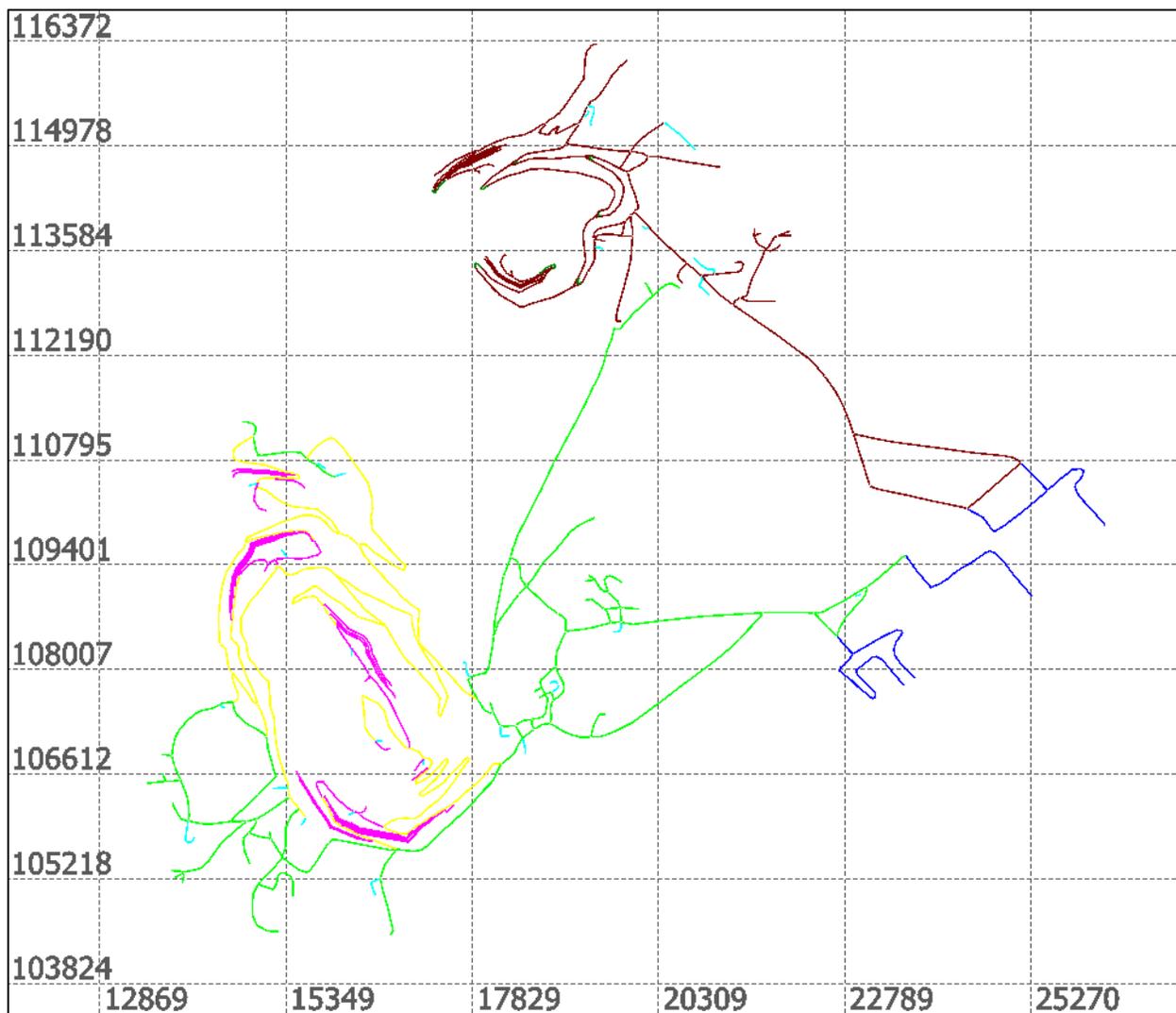


Figura N° 9-15: Rutas en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.

9.6.2.3 FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

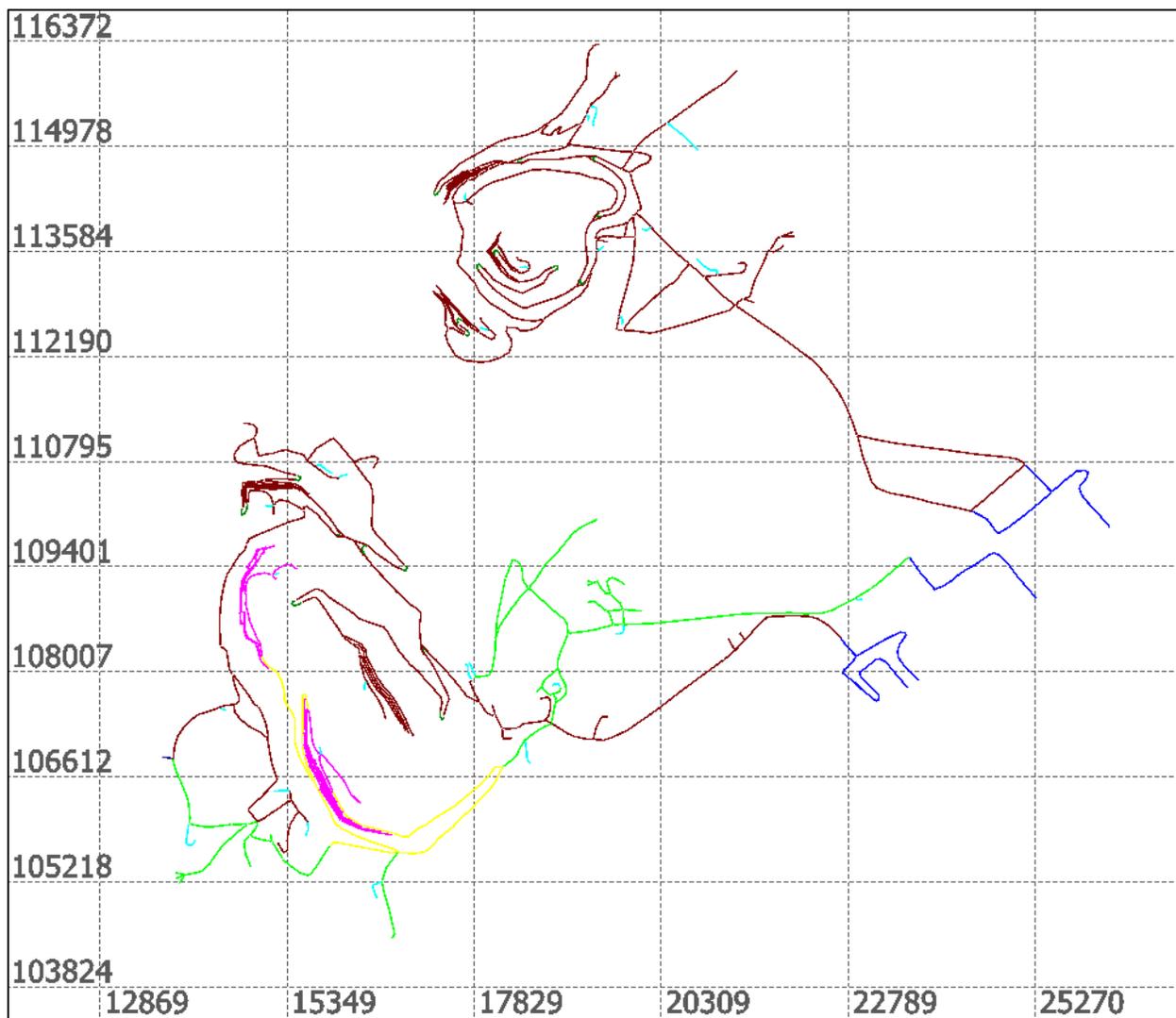


Figura N° 9-16: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.

9.6.2.4 FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma

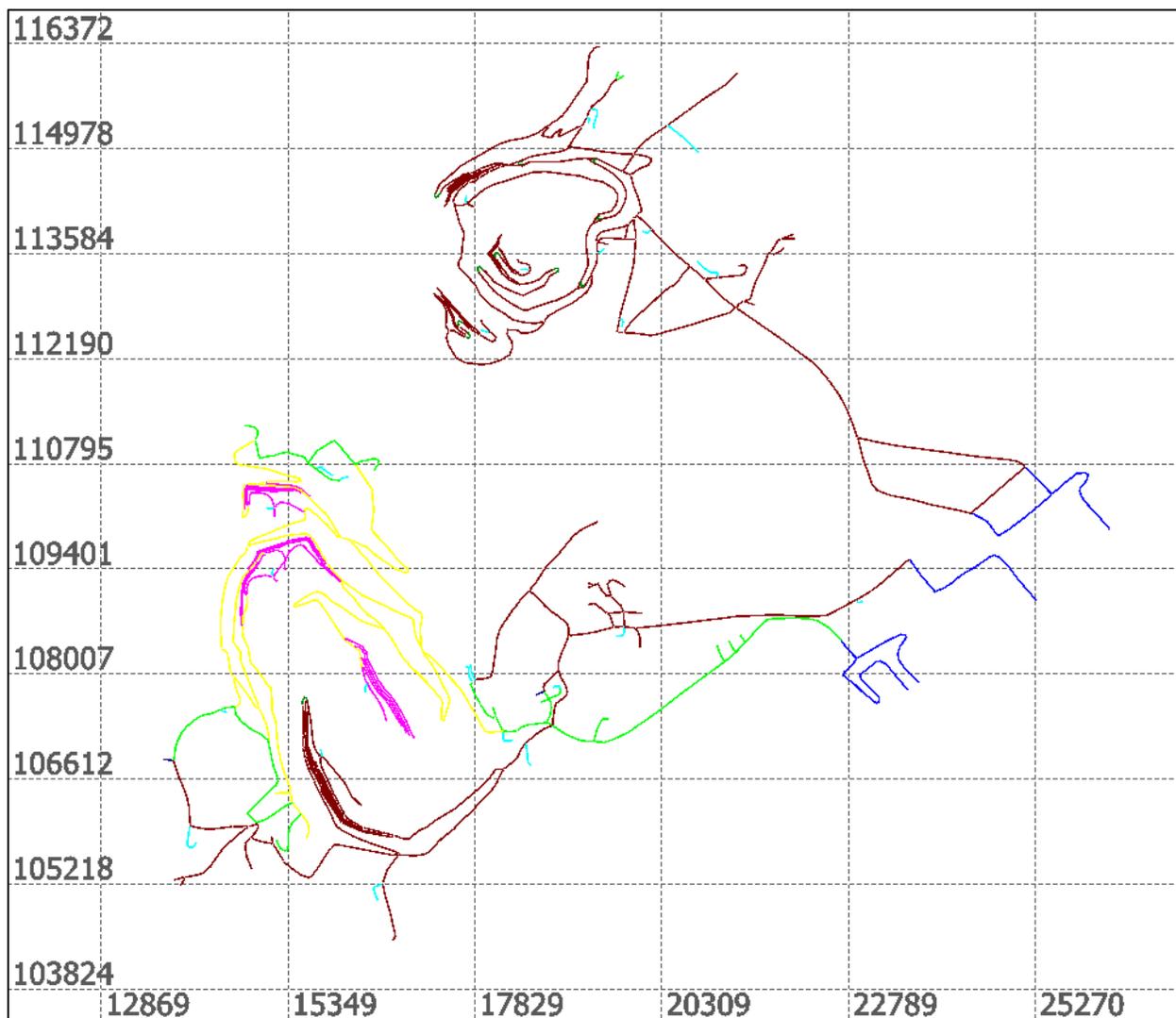


Figura N° 9-17: Rutas en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.

9.6.2.5 FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

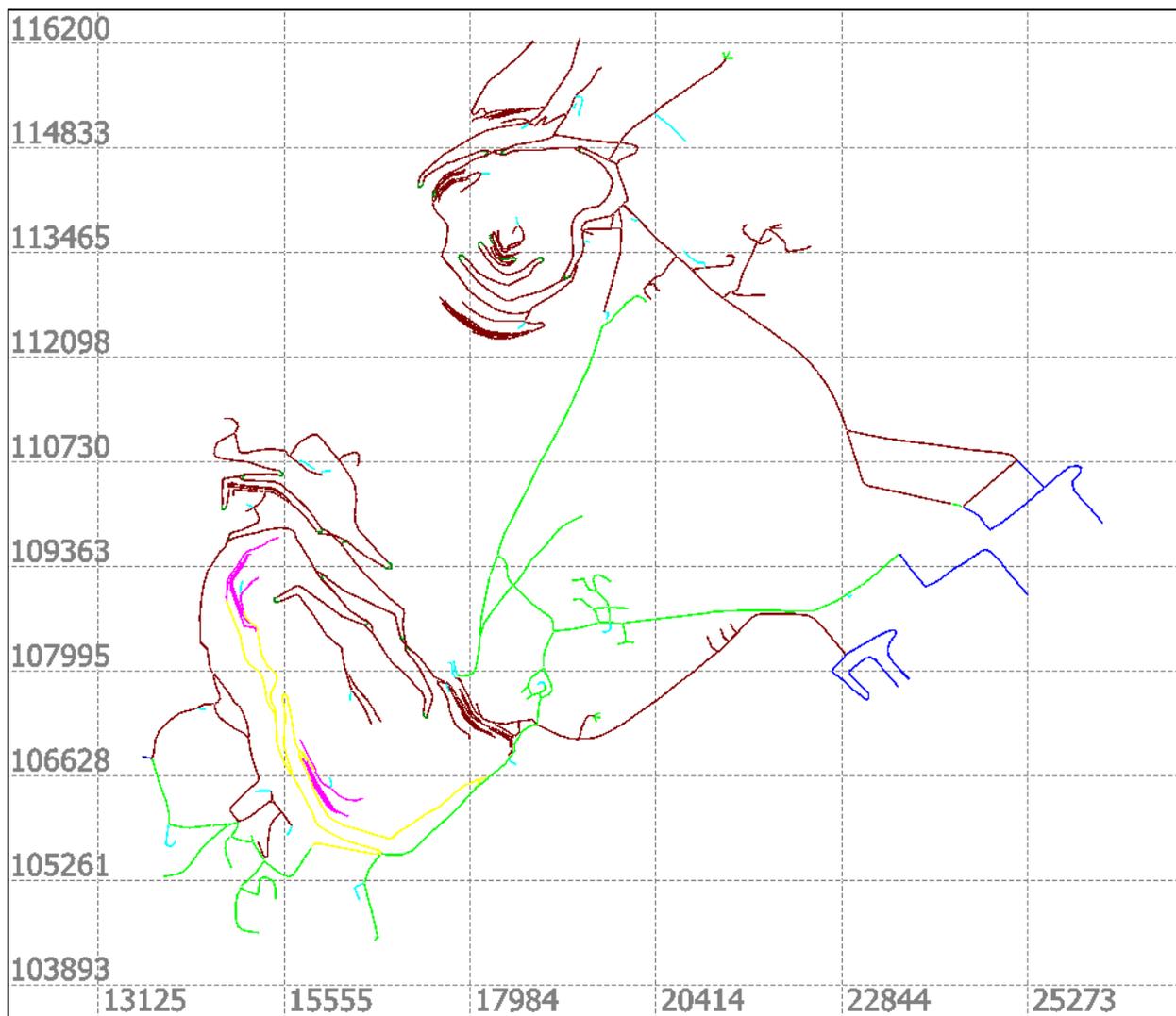


Figura N° 9-18: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.

9.6.2.6 FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

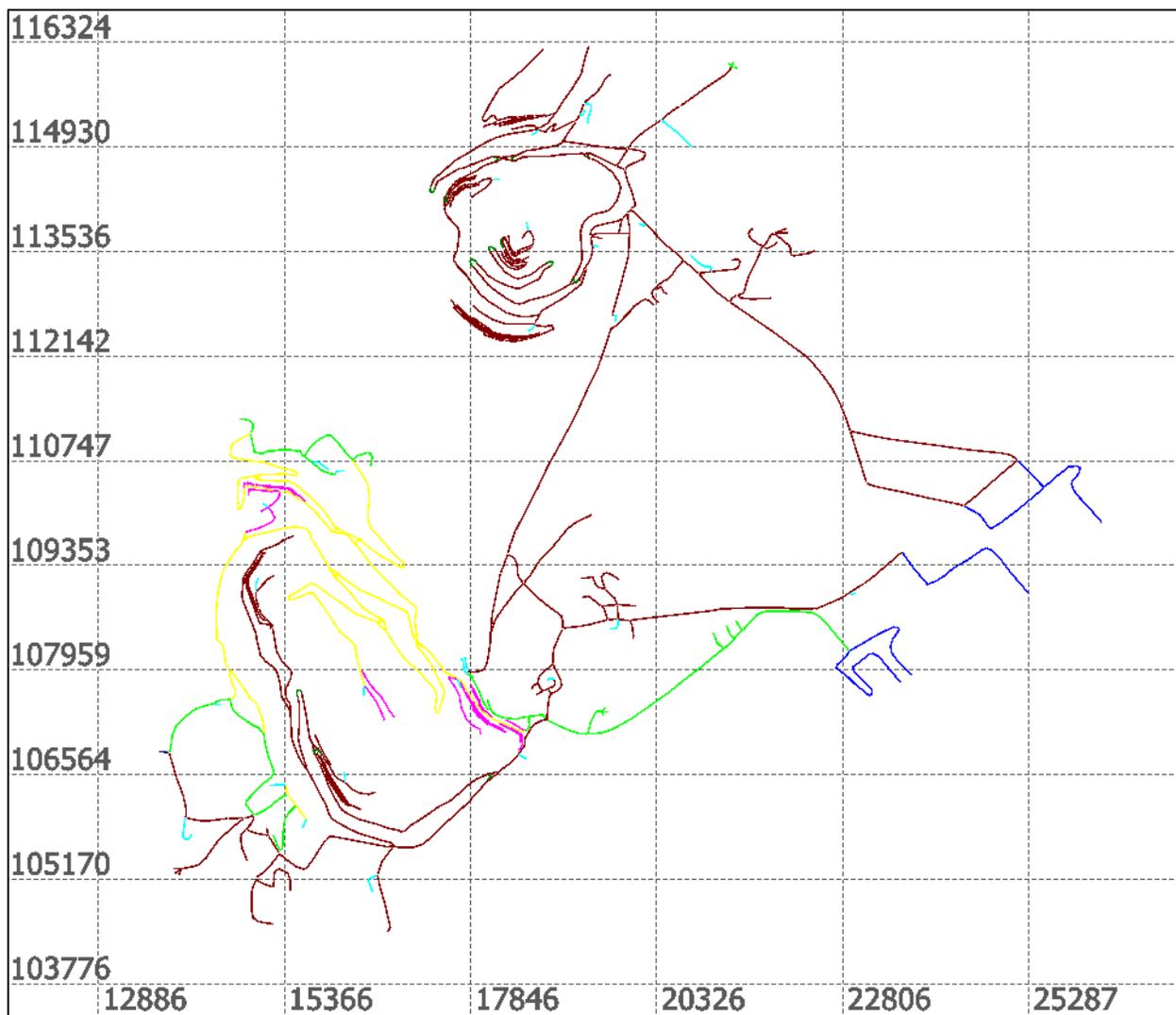


Figura N° 9-19: Rutas en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.

9.6.2.7 FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

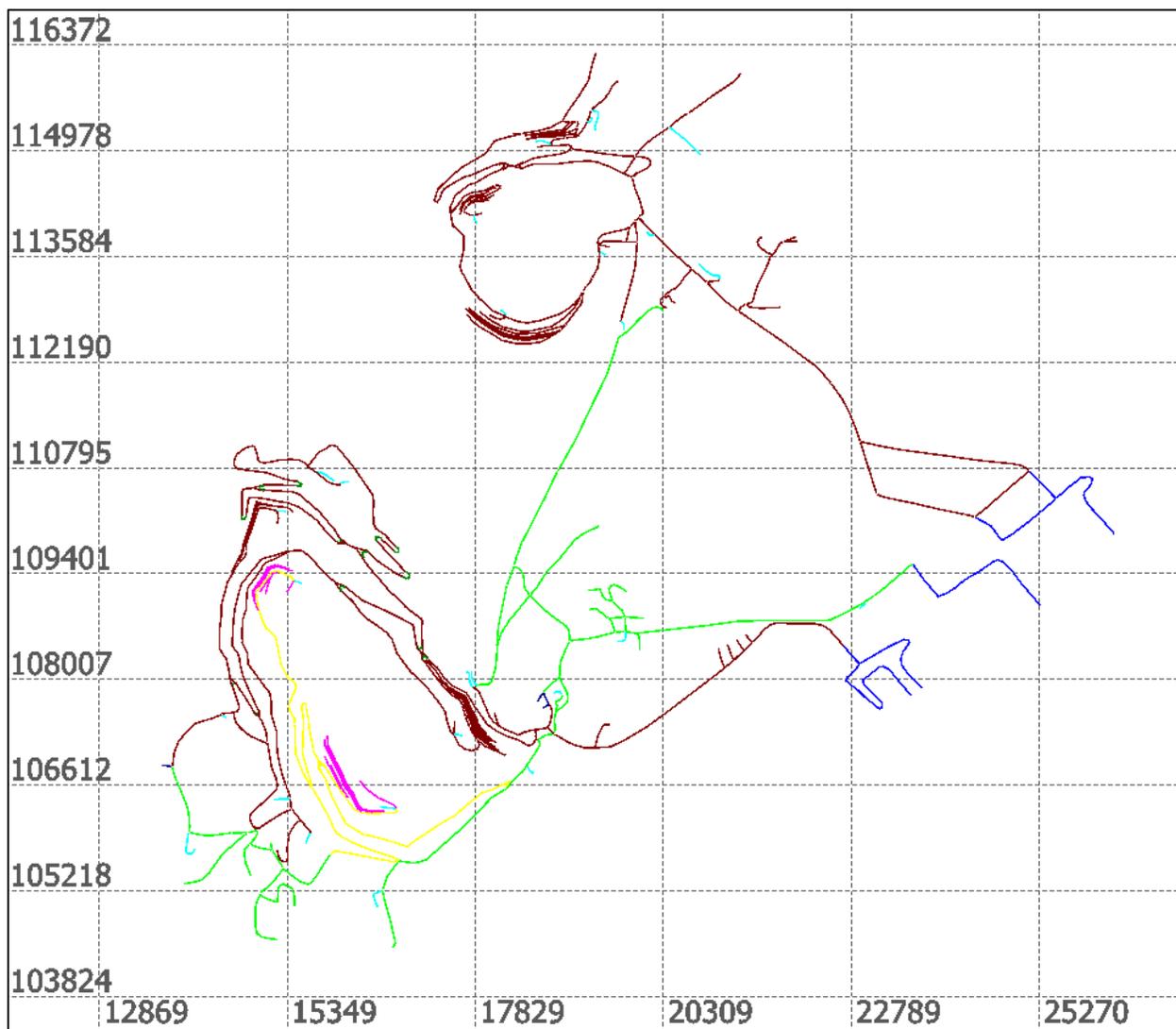


Figura N° 9-20: Rutas en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.

9.6.2.8 FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

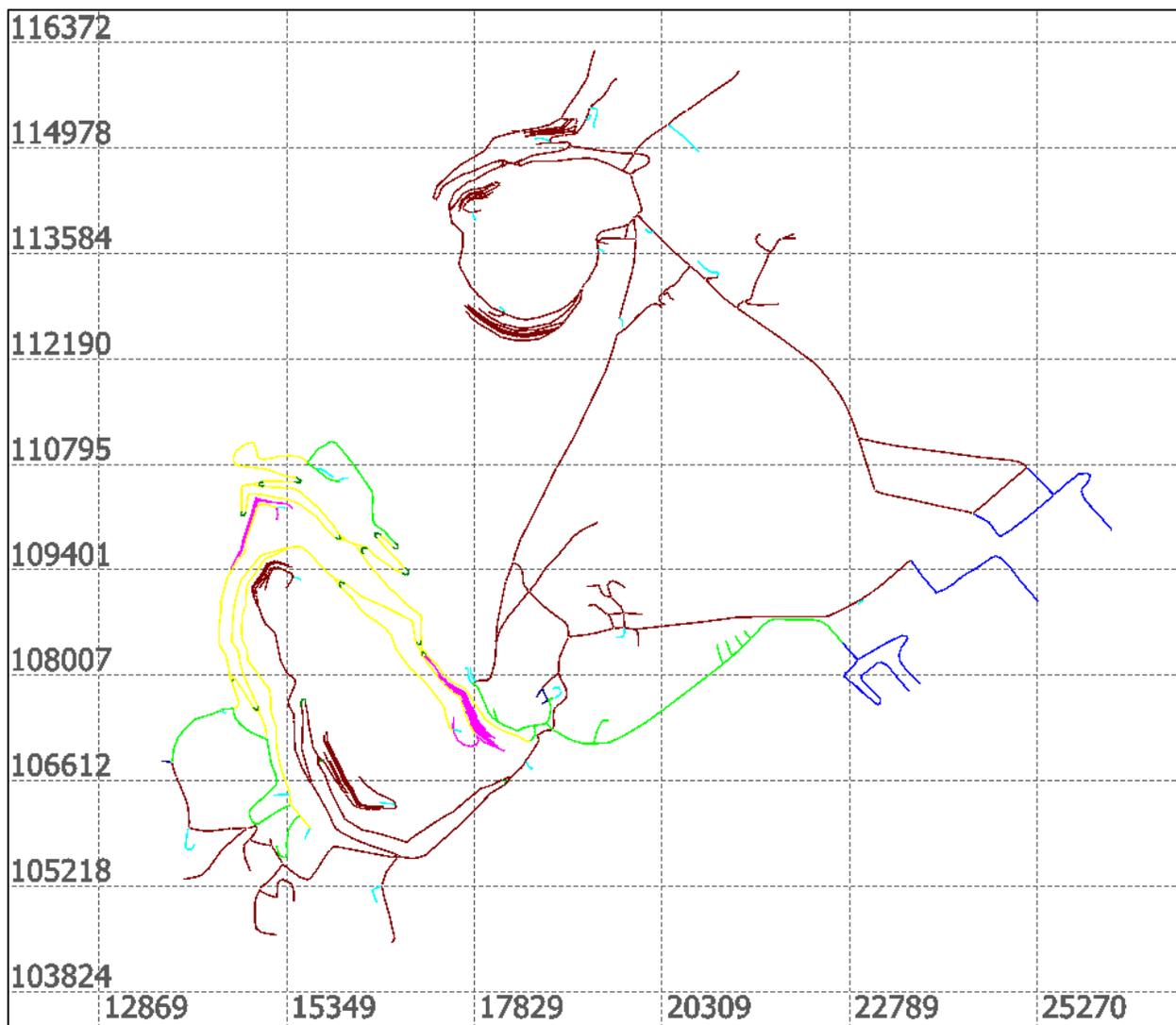


Figura N° 9-21: Rutas en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.

9.6.2.9 FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma

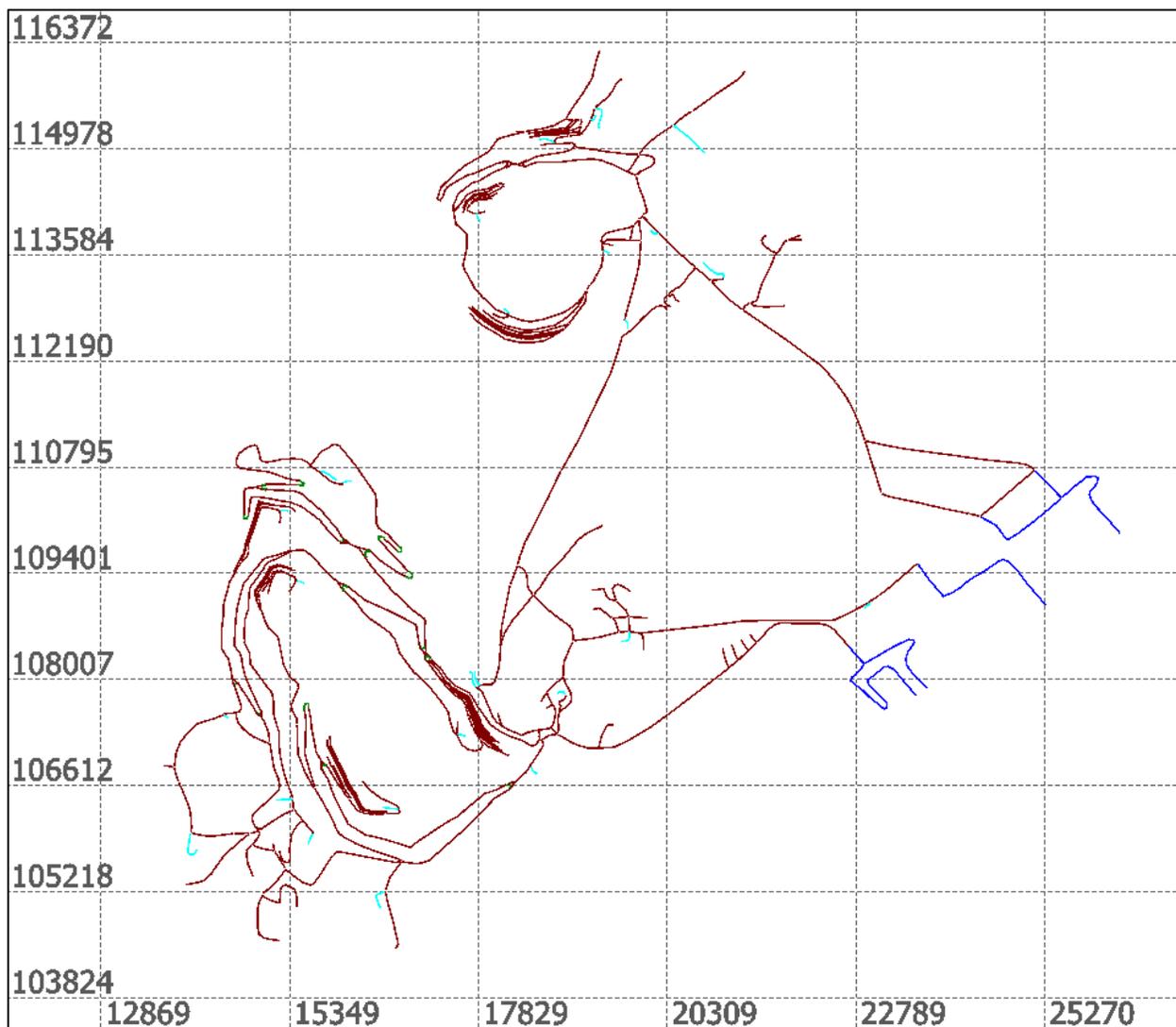


Figura N° 9-22: Rutas en caso Escondida full autónomo, FY 2028.

## 9.7 Tiempos de ciclo

### 9.7.1 Casos Base

#### 9.7.1.1 FY 2024

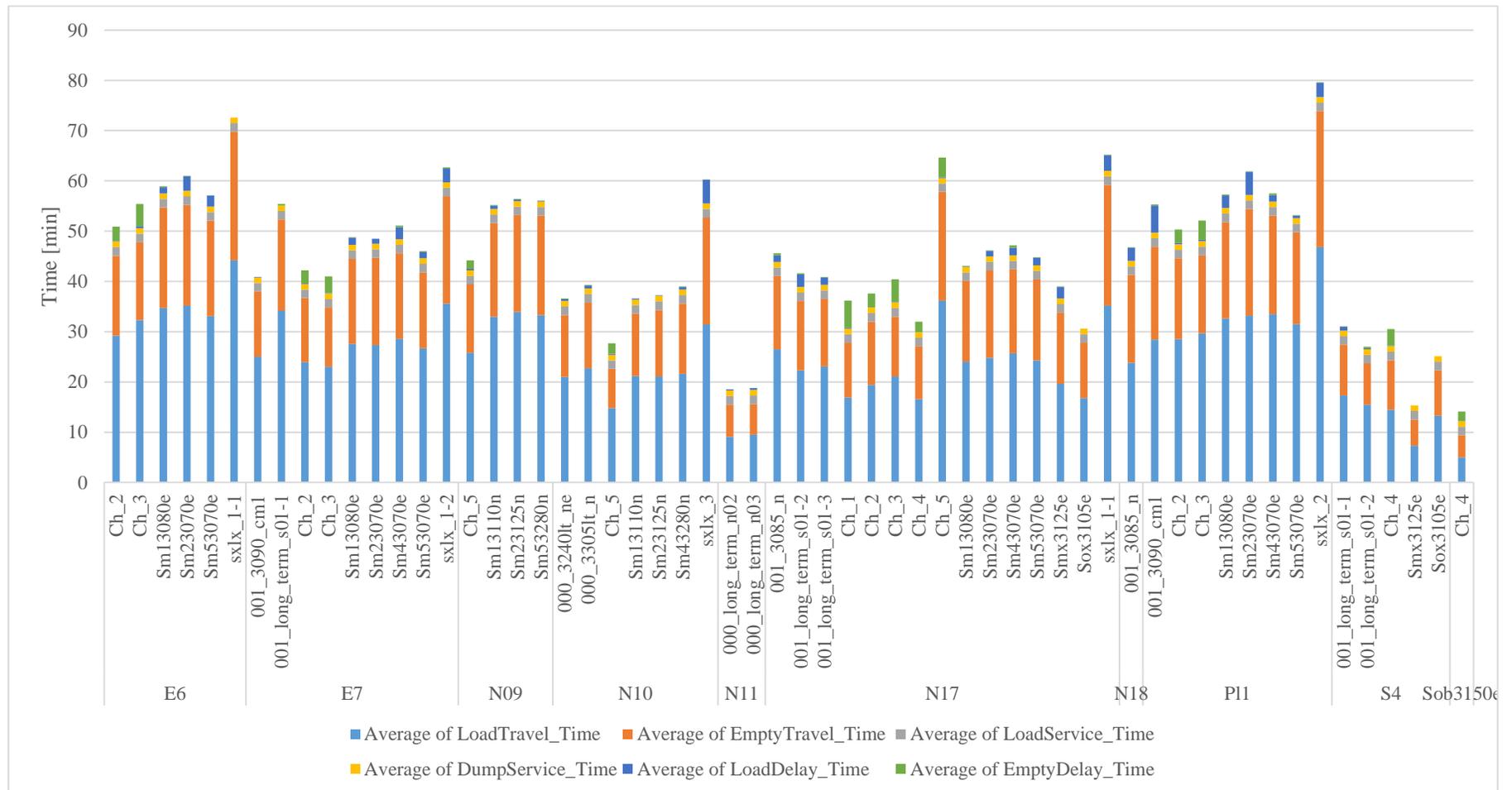


Gráfico N° 9-1: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2024.

9.7.1.2 FY 2025

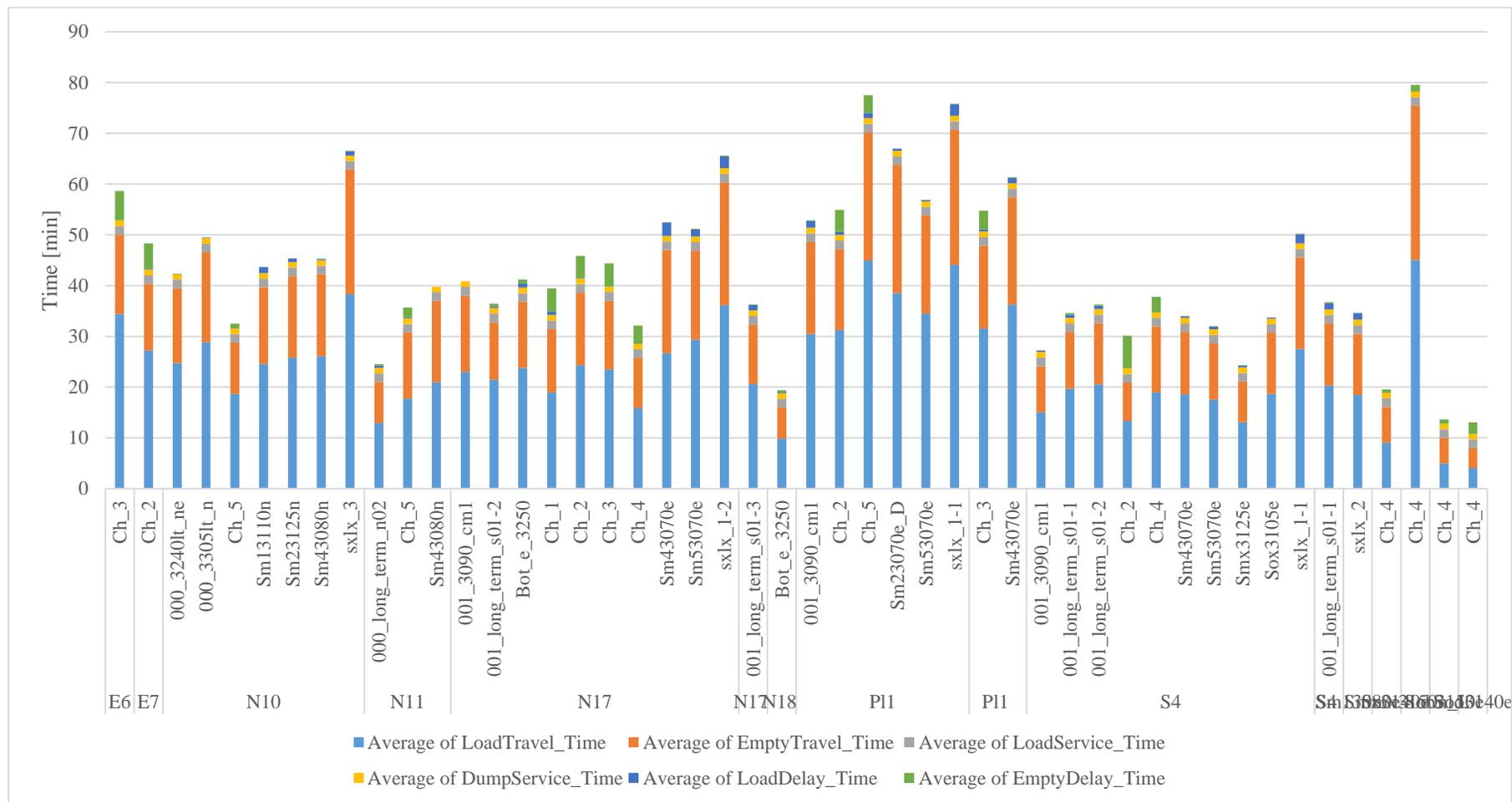


Gráfico N° 9-2: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2025.

9.7.1.3 FY 2026

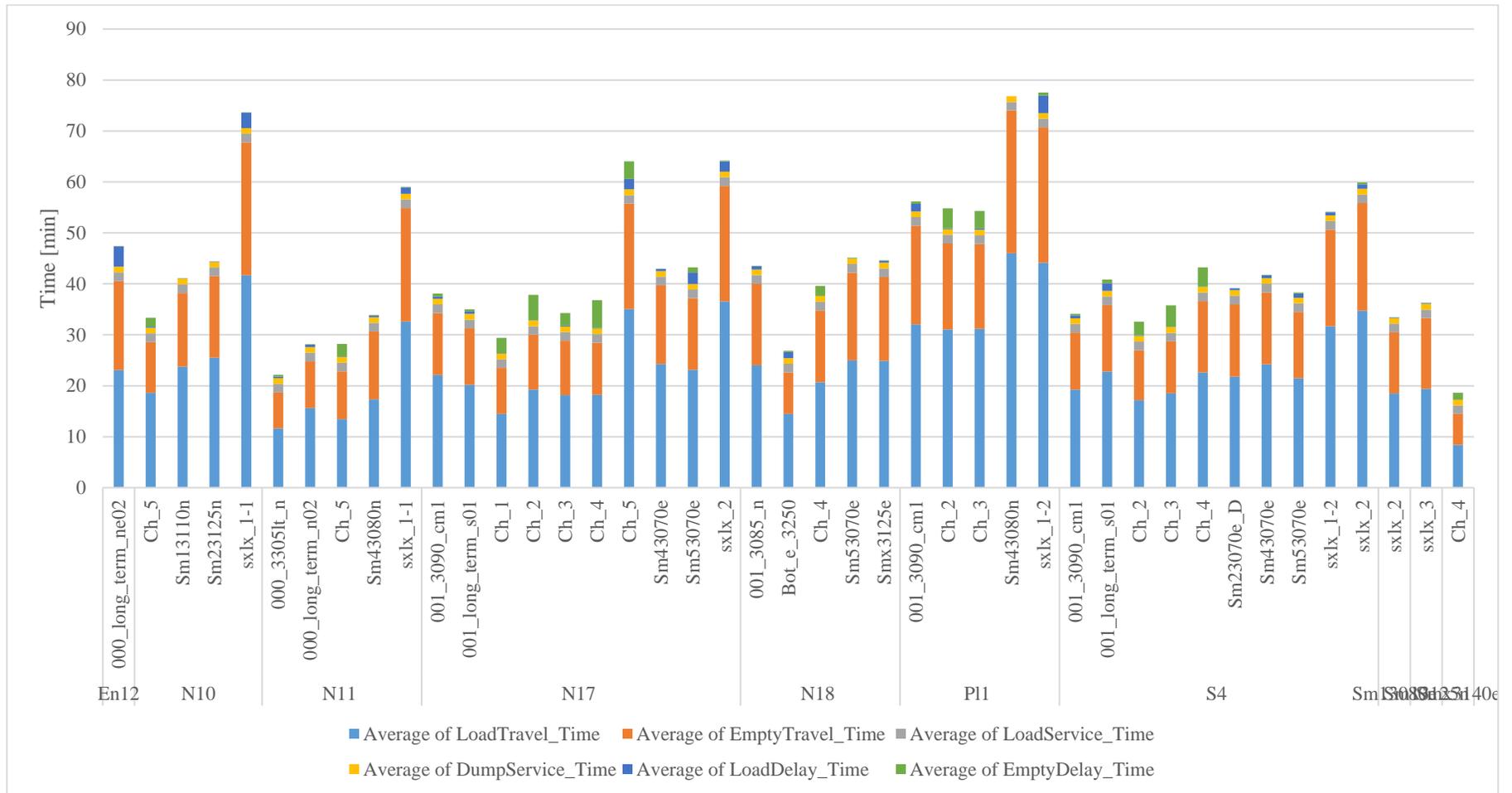


Gráfico N° 9-3: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2026.

9.7.1.4 FY 2027

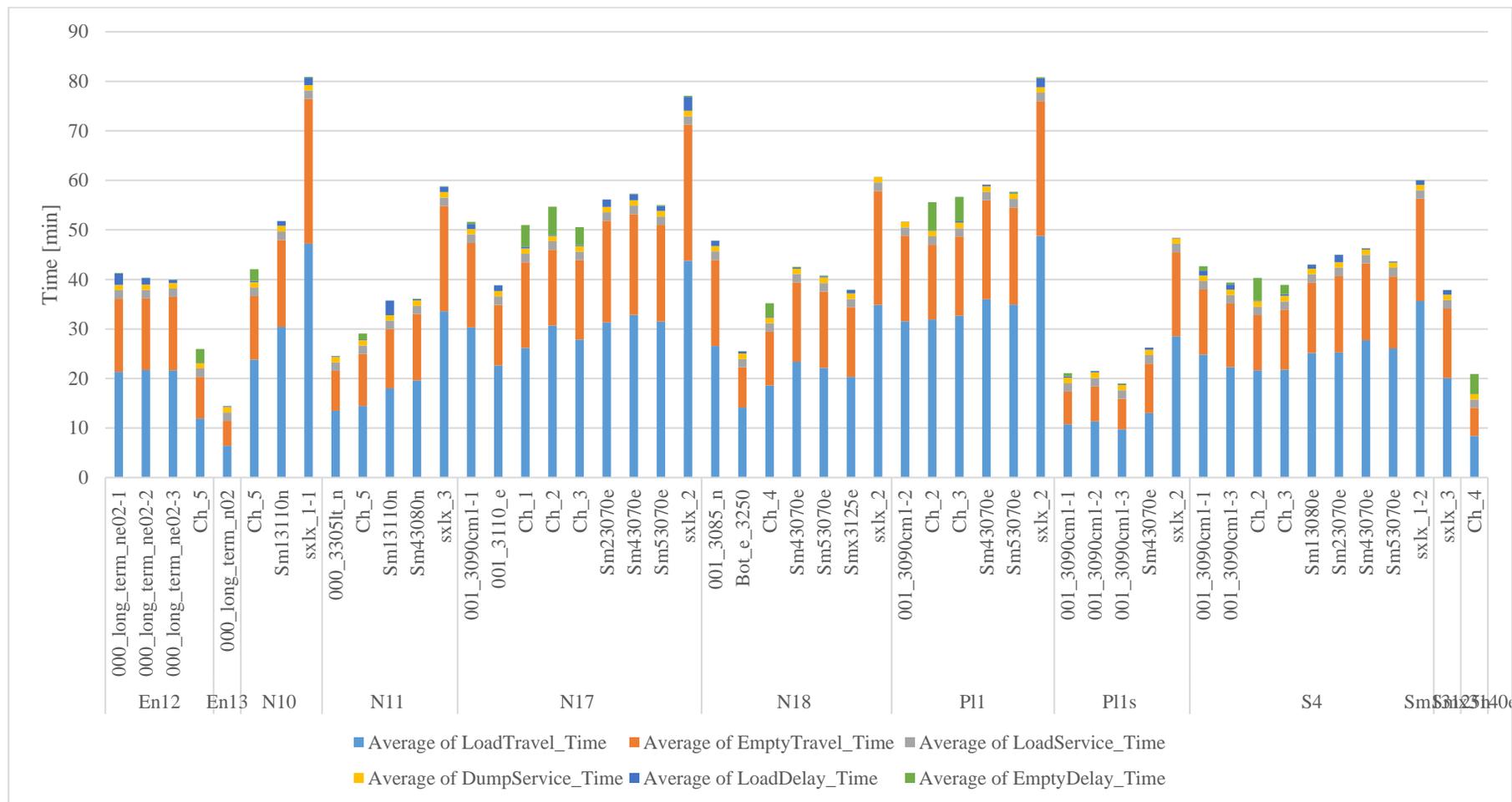


Gráfico N° 9-4: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2027.

9.7.1.5 FY 2028

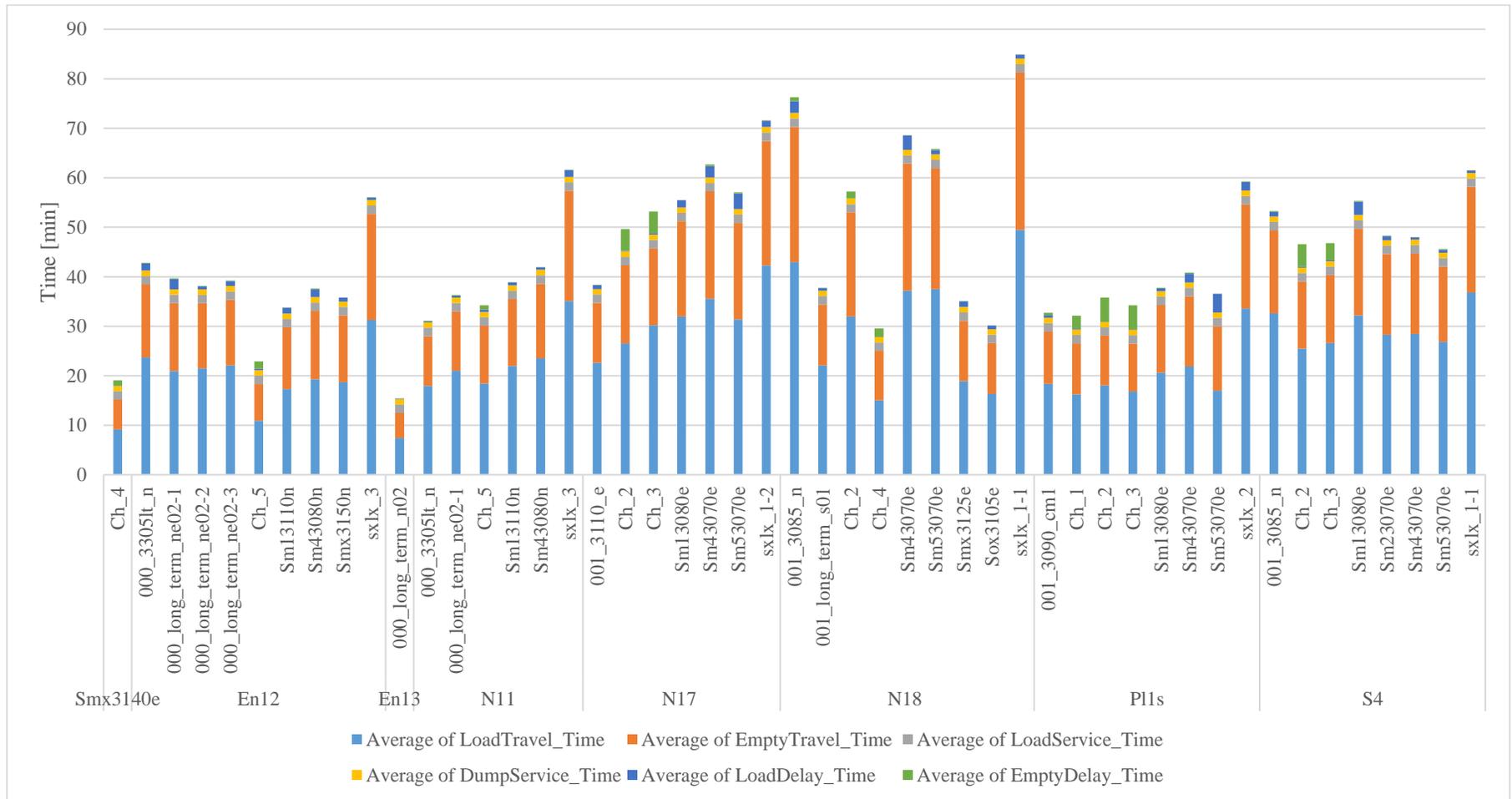


Gráfico N° 9-5: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino, FY 2028.

## 9.7.2 Casos con proyecto

### 9.7.2.1 FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

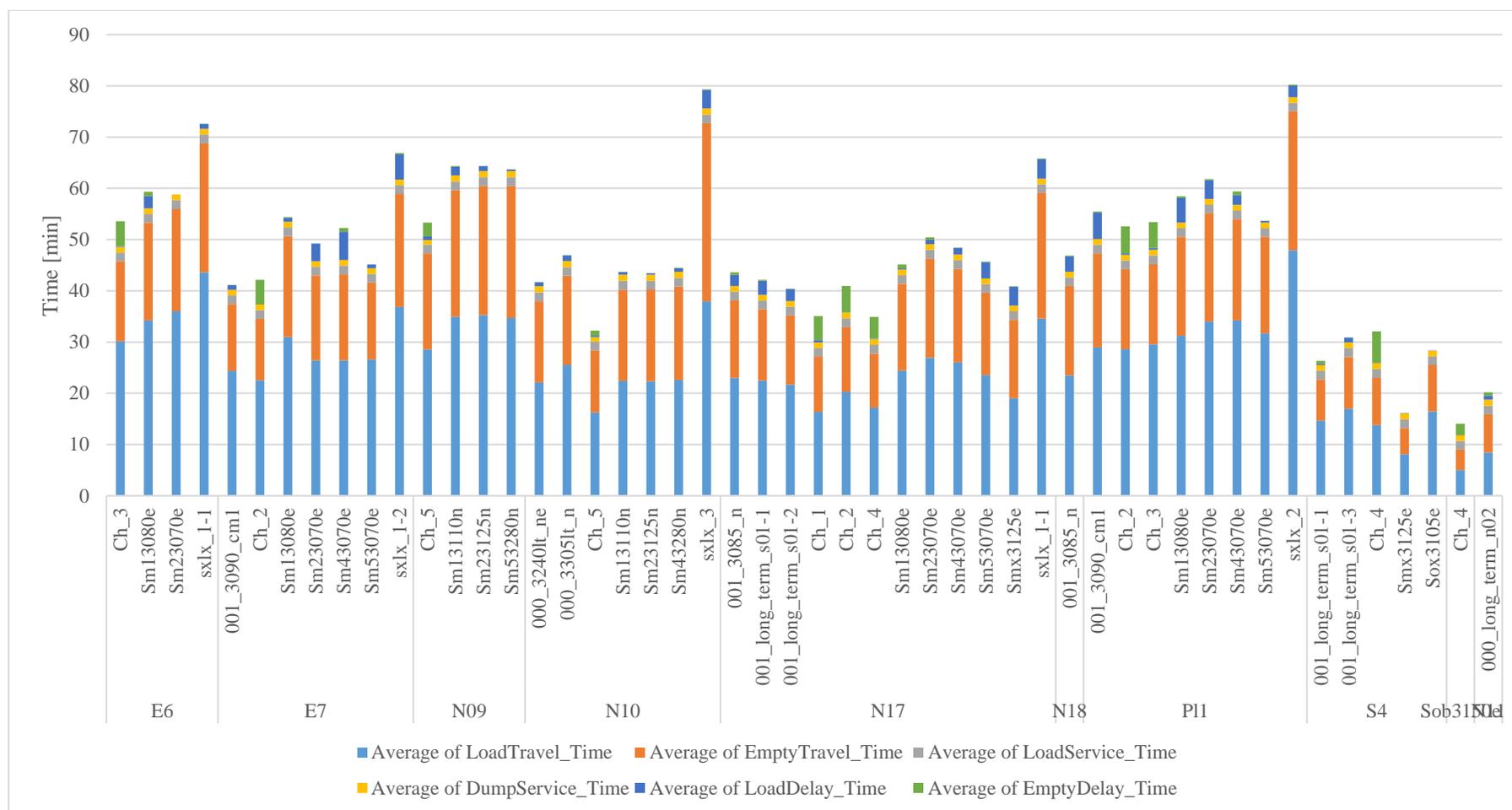


Gráfico N° 9-6: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.

9.7.2.2 FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

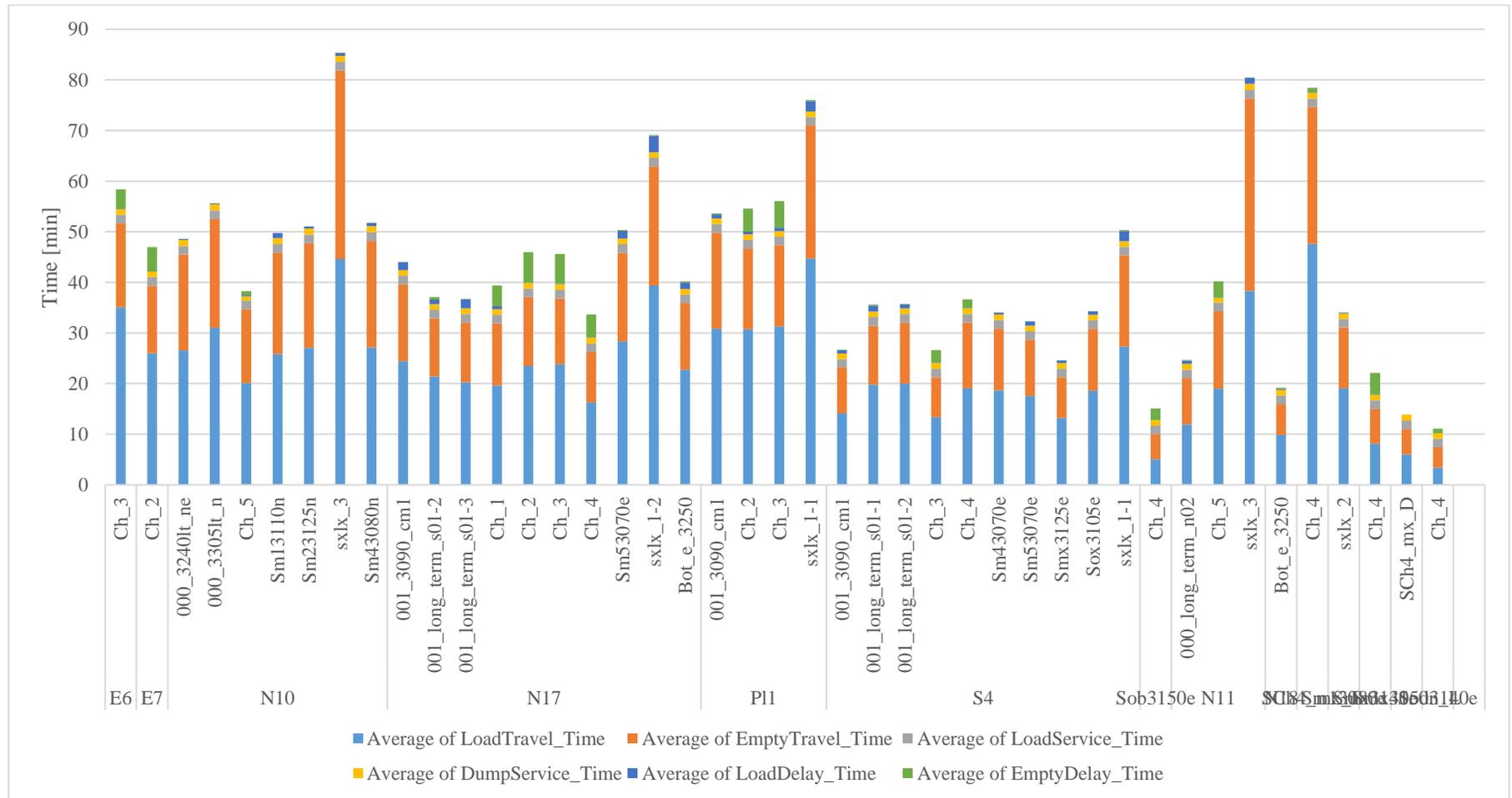


Gráfico N° 9-7: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.

9.7.2.3 FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

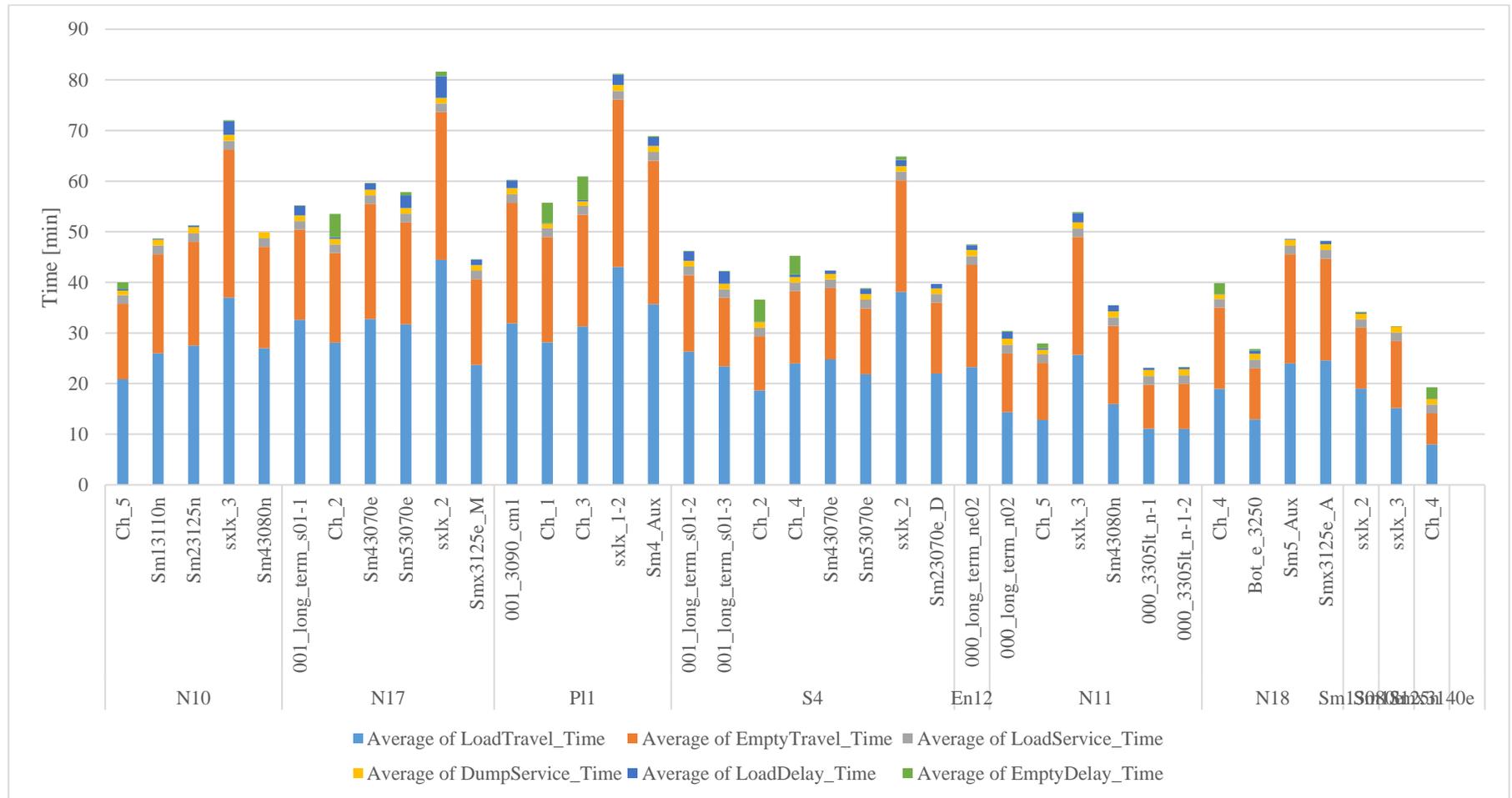


Gráfico N° 9-8: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.

9.7.2.4 FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma

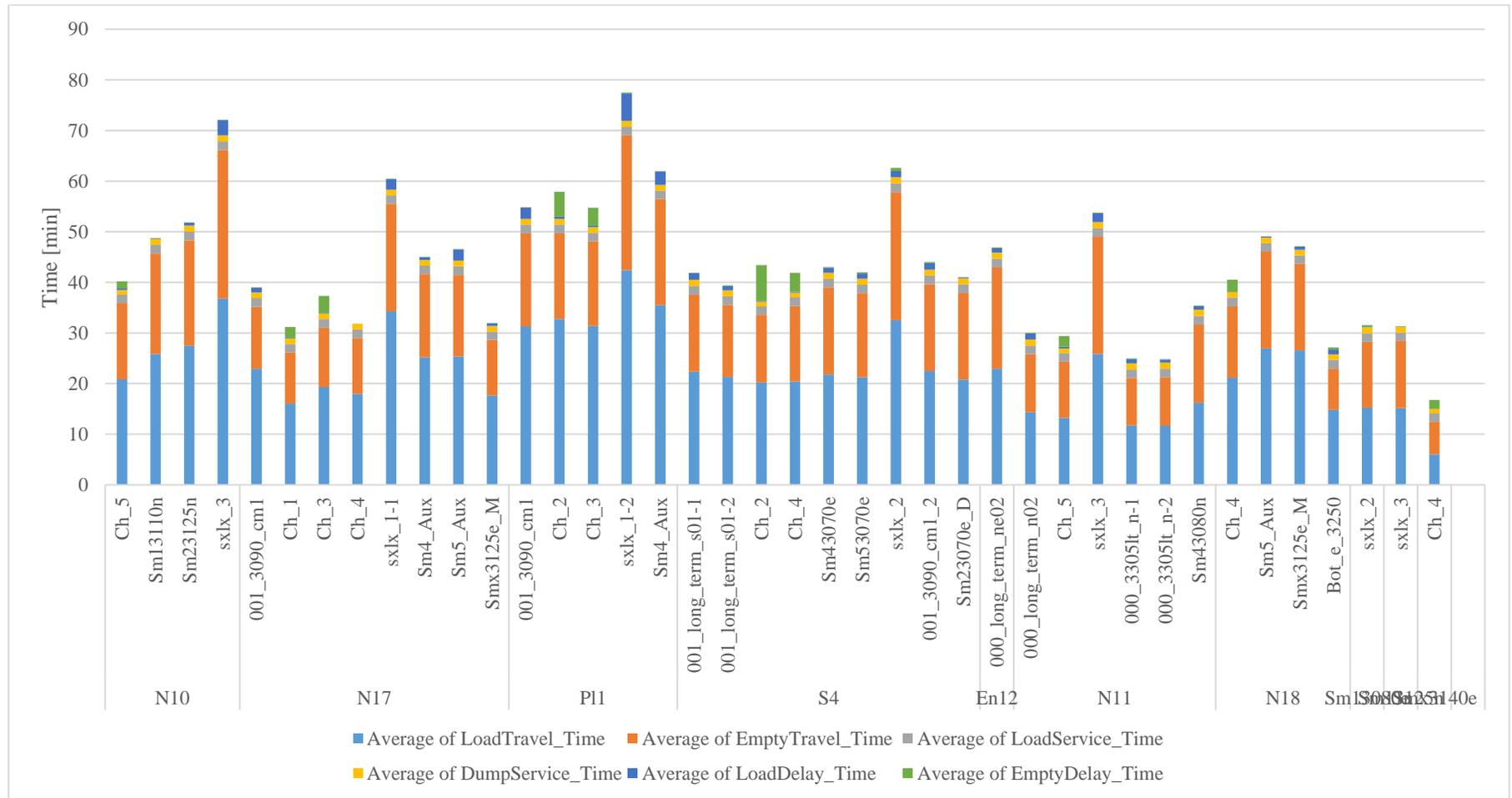


Gráfico N° 9-9: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.

9.7.2.5 FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

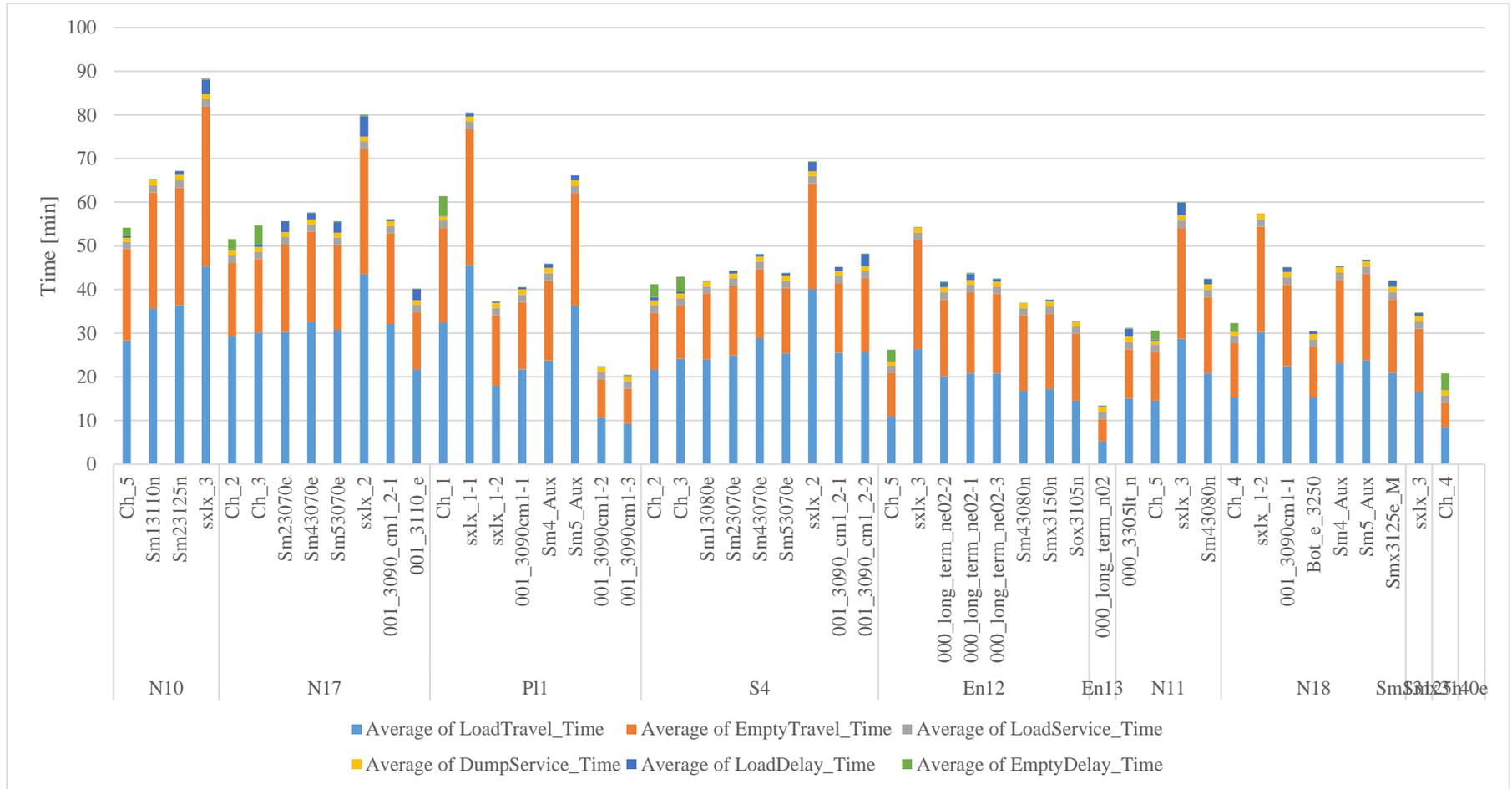


Gráfico N° 9-10: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónoma, FY 2027.

9.7.2.6 FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

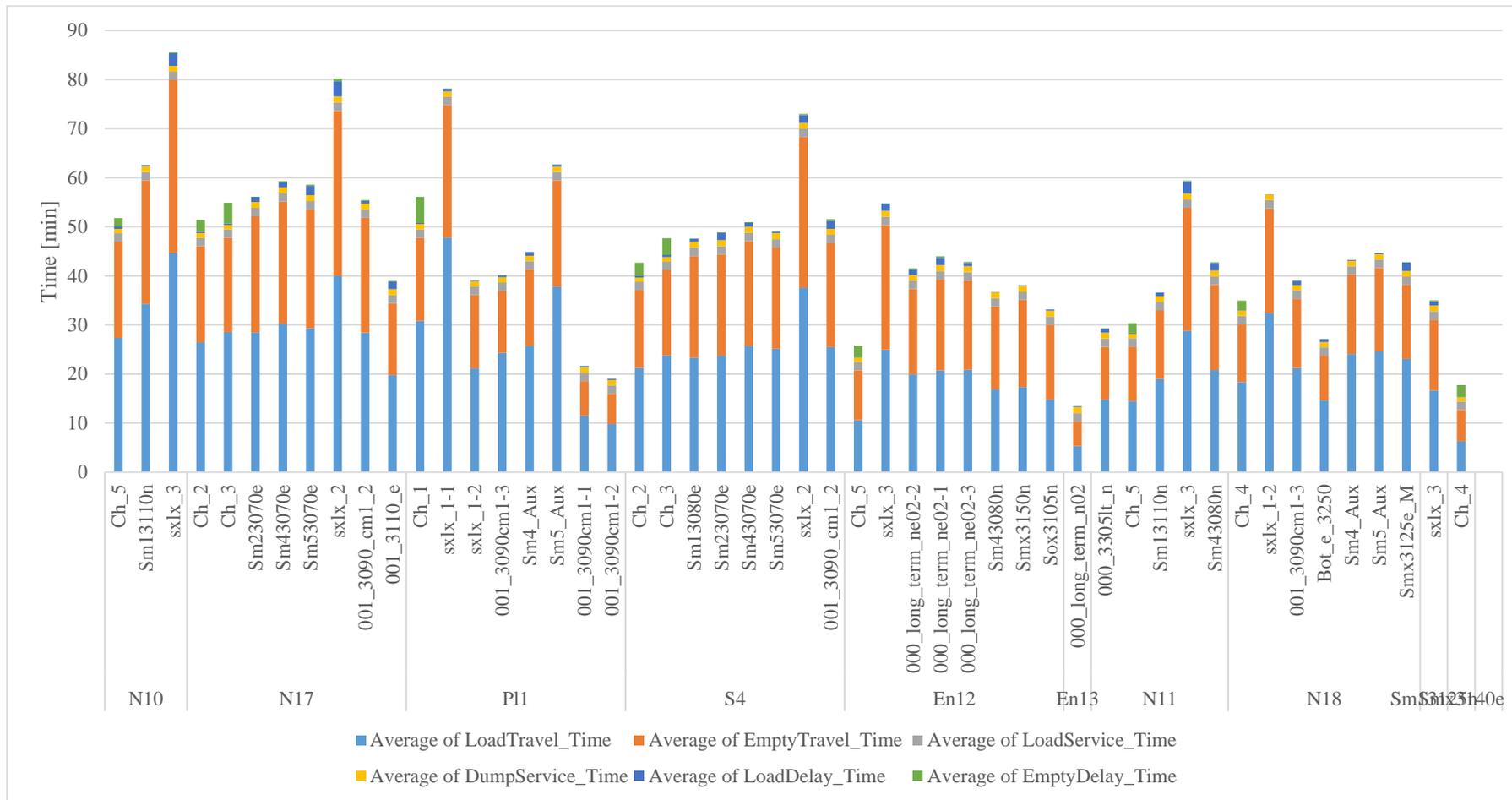


Gráfico N° 9-11: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.

9.7.2.7 FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

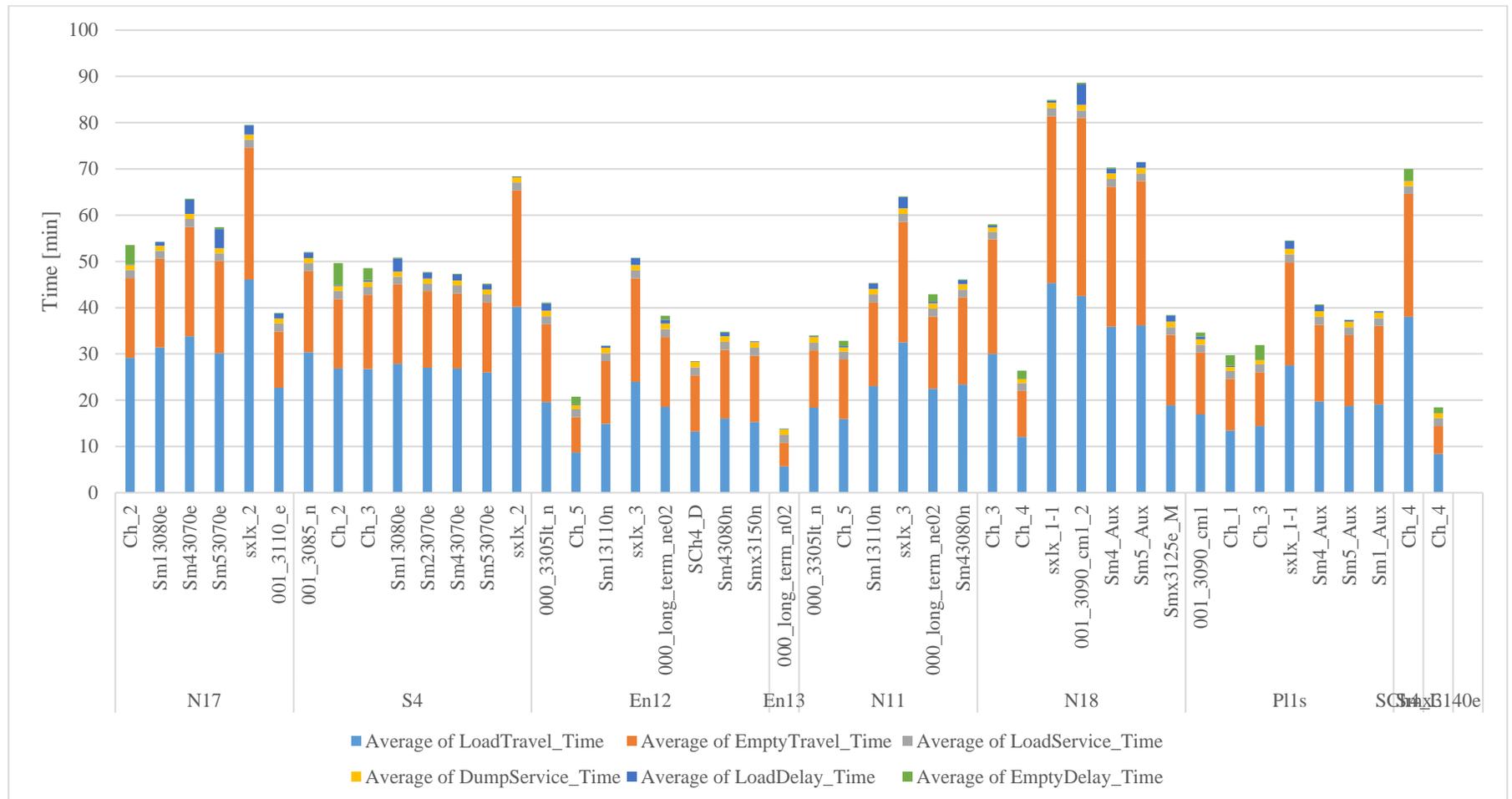


Gráfico N° 9-12: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.

9.7.2.8 FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

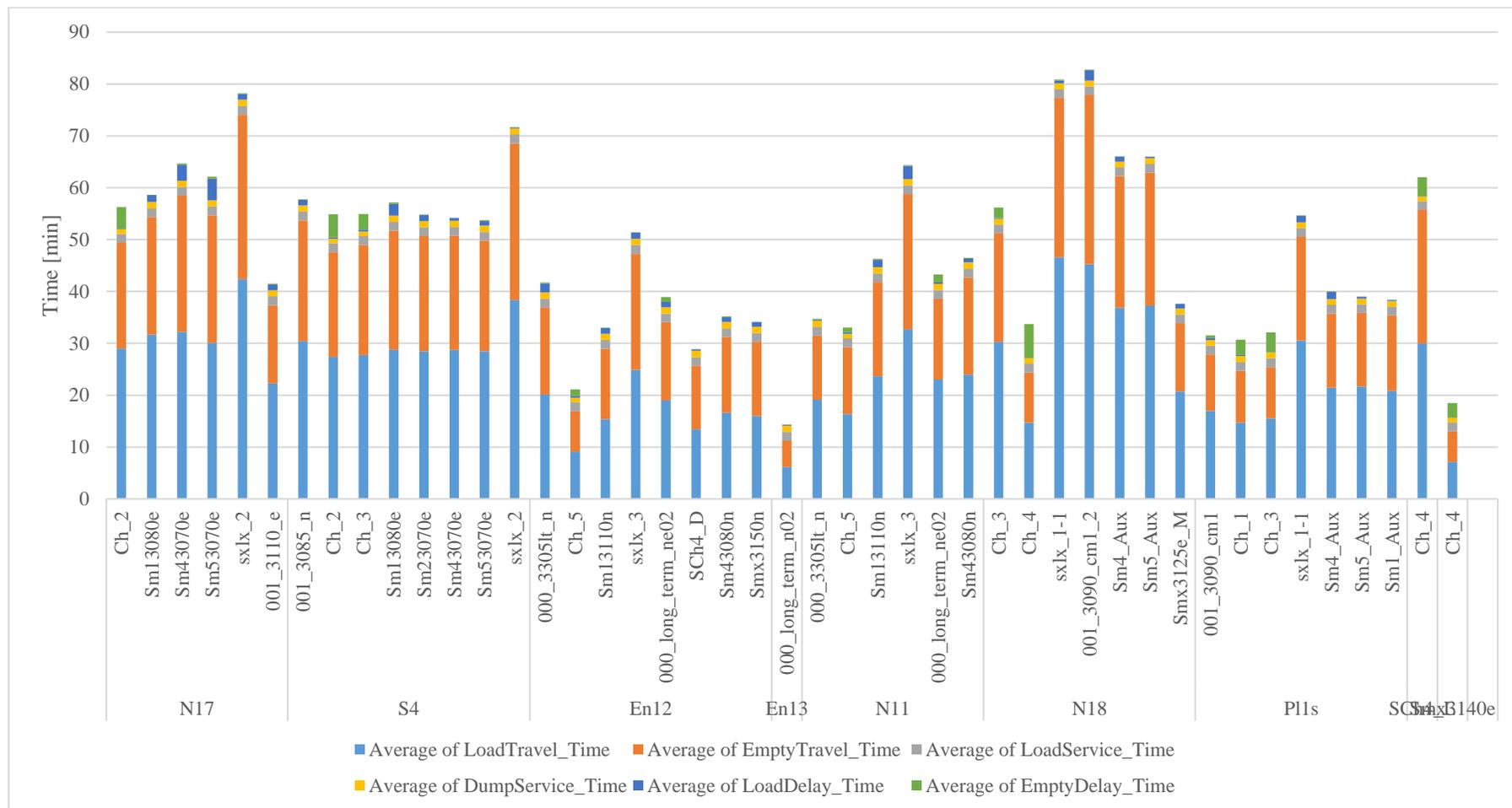


Gráfico N° 9-13: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónoma, FY 2028.

9.7.2.9 FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma

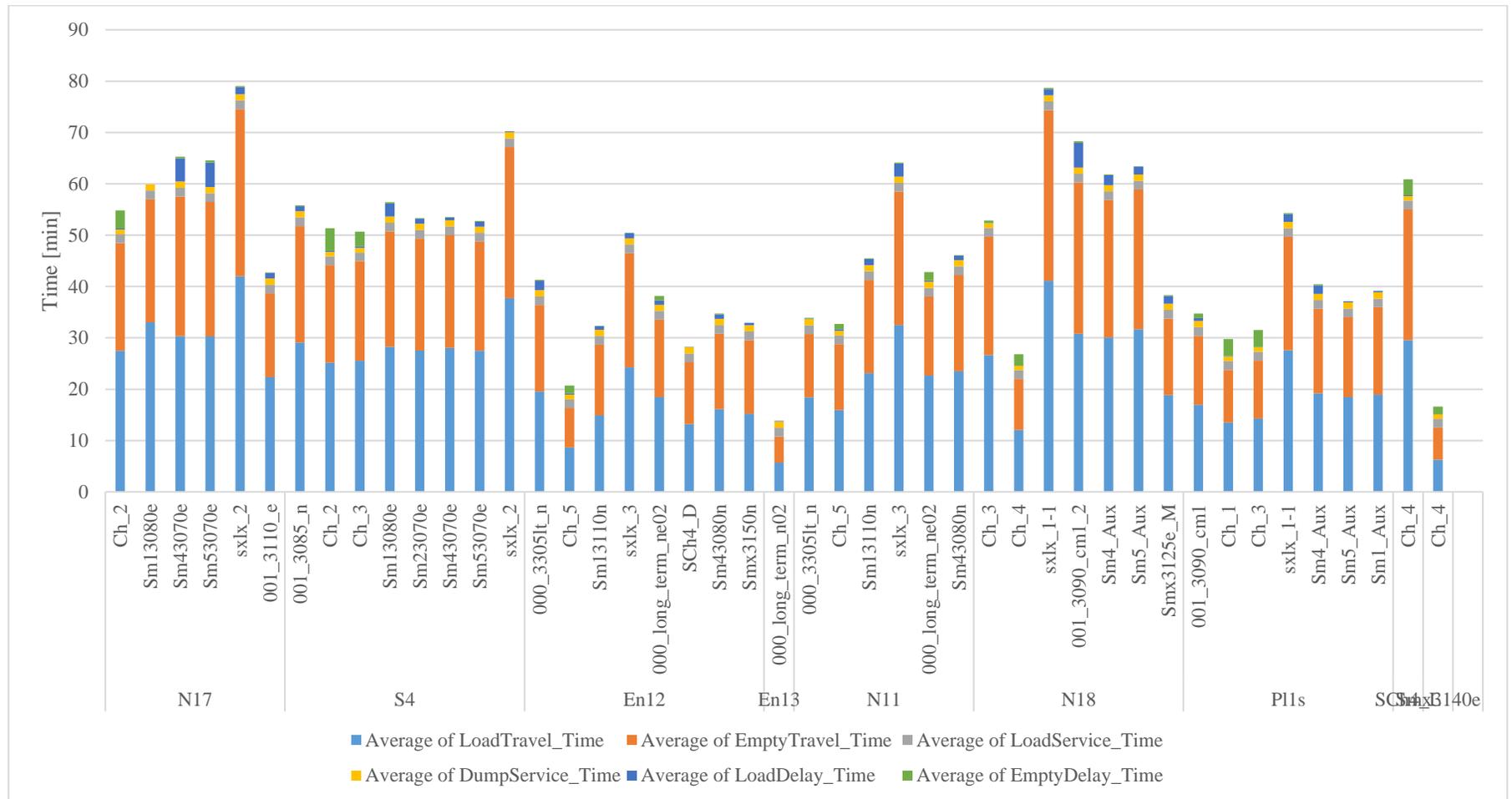


Gráfico N° 9-14: Desglose de actividades de tiempo de ciclo por origen-destino en caso Escondida full autónomo, FY 2028.

## 9.8 Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base

### 9.8.1 FY 2024 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

Tabla N° 9-9: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2024.

Caso Escondida Norte autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos	Total	Producción Escondida	Producción Escondida Norte	Total	
Número de camiones con respecto a CB	Escondida		Escondida Norte		[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]
	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E					
<b>Caso base</b>	38	99	28	165	969,795	323,174	1,292,969	93.6
<b>1.0</b>	38	99	29	166	967,510	324,824	1,292,334	93.6
<b>0.0</b>	38	99	28	165	962,894	324,653	1,287,548	93.2
<b>-1.0</b>	38	99	27	164	958,929	320,580	1,279,509	92.6
<b>-2.0</b>	38	99	26	163	965,411	308,126	1,273,537	92.2

## 9.8.2 FY 2025 – Escondida Norte en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-10: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte autónomo, FY 2025.**

Caso Escondida Norte autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos	Total	Producción Escondida	Producción Escondida Norte	Total	
	Escondida		Escondida Norte		[t]	[t]	[% cumplimiento]	
Número de camiones con respecto CB	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E					
<b>Caso base</b>	32	85	22	139	983,923	283,234	1,267,157	93.3
<b>2.0</b>	32	85	24	141	983,153	283,252	1,266,405	93.2
<b>1.0</b>	32	85	23	140	975,124	282,250	1,257,374	92.5
<b>0.0</b>	32	85	22	139	984,821	268,047	1,252,867	92.2
<b>-1.0</b>	32	85	21	138	982,561	260,125	1,242,686	91.5
<b>-2.0</b>	32	85	20	137	976,483	251,097	1,227,580	90.4

### 9.8.3 FY 2026 – EN y fases P11 y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-11: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11 y N18 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Caso Escondida Norte + P11&N18 autónomo Número de camiones con respecto a caso base	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción Escondida	Producción Escondida	Producción	Total	
	Escondida N17&S4	Escondida P11&N18	Escondida Norte			N17&S4 [t]	P11&N18 [t]	Escondida Norte [t]	[t]	[% cumplimiento]
	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E						
<b>Caso base</b>	20	65	45	34	164	597,717	364,037	378,342	1,340,096	96.2
<b>15.0</b>	20	69	50	39	178	583,241	368,309	375,611	1,327,162	95.3
<b>14.0</b>	20	69	49	39	177	583,241	373,667	375,611	1,332,519	95.7
<b>13.0</b>	20	69	49	39	177	588,792	373,667	375,611	1,338,070	96.1
<b>12.0</b>	20	68	49	38	175	588,792	373,667	369,795	1,332,254	95.6
<b>11.0</b>	20	68	48	38	174	588,792	368,798	369,795	1,327,385	95.3
<b>10.0</b>	20	68	48	38	174	584,827	368,798	369,795	1,323,420	95.0
<b>9.0</b>	20	67	48	37	172	584,827	368,798	361,859	1,315,484	94.4
<b>8.0</b>	20	67	47	37	171	584,827	364,653	361,859	1,311,340	94.1
<b>7.0</b>	20	67	47	37	171	583,802	364,653	361,859	1,310,314	94.1
<b>6.0</b>	20	66	47	36	169	583,802	364,653	357,944	1,306,399	93.8
<b>5.0</b>	20	66	46	36	168	583,802	365,086	357,944	1,306,831	93.8
<b>4.0</b>	20	66	46	36	168	578,122	365,086	357,944	1,301,151	93.4
<b>3.0</b>	20	65	46	35	166	578,122	365,086	358,711	1,301,919	93.5
<b>2.0</b>	20	65	45	35	165	578,122	367,003	358,711	1,303,836	93.6
<b>1.0</b>	20	65	45	35	165	577,463	367,003	358,711	1,303,177	93.6
<b>0.0</b>	20	65	45	34	164	577,463	367,003	348,659	1,293,125	92.8
<b>-3.0</b>	20	64	44	33	161	575,465	364,332	345,254	1,285,052	92.3
<b>-6.0</b>	20	63	43	32	158	574,335	358,423	337,292	1,270,050	91.2

## 9.8.4 FY 2026 – EN y fase S4 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-12: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fase S4 de Escondida autónomo, FY 2026.**

Caso Escondida Norte + S4 autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción Escondida N17&P11&N18 [t]	Producción Escondida S4 [t]	Producción Escondida Norte [t]	Total [t]	[% cumplimiento]
	Escondida N17&P11&N18	Escondida a S4	Escondida a S4	Escondida Norte						
Número de camiones con respecto a caso base	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E						
<b>Caso base</b>	21	60	49	34	164	538,202	423,552	378,342	1,340,096	96.2
<b>15.0</b>	21	65	54	40	180	542,505	407,929	370,947	1,321,381	94.9
<b>14.0</b>	21	64	54	39	178	542,572	407,929	370,947	1,321,448	94.9
<b>13.0</b>	21	64	54	38	177	542,572	407,929	364,973	1,315,474	94.4
<b>12.0</b>	21	64	53	38	176	542,572	417,158	364,973	1,324,703	95.1
<b>11.0</b>	21	63	53	38	175	541,845	417,158	364,973	1,323,976	95.1
<b>10.0</b>	21	63	53	37	174	541,845	417,158	367,997	1,327,000	95.3
<b>9.0</b>	21	63	52	37	173	541,845	403,685	367,997	1,313,527	94.3
<b>8.0</b>	21	62	52	37	172	537,790	403,685	367,997	1,309,472	94.0
<b>7.0</b>	21	62	52	36	171	537,790	403,685	369,078	1,310,553	94.1
<b>6.0</b>	21	62	51	36	170	537,790	402,717	369,078	1,309,585	94.0
<b>5.0</b>	21	61	51	36	169	536,241	402,717	369,078	1,308,036	93.9
<b>4.0</b>	21	61	51	35	168	536,241	402,717	351,703	1,290,661	92.7
<b>3.0</b>	21	61	50	35	167	536,241	409,829	351,703	1,297,773	93.2
<b>2.0</b>	21	60	50	35	166	541,938	409,829	351,703	1,303,470	93.6
<b>1.0</b>	21	60	50	34	165	541,938	409,829	349,667	1,301,434	93.4
<b>0.0</b>	21	60	49	34	164	541,938	401,277	349,667	1,292,882	92.8
<b>-3.0</b>	21	59	48	33	161	541,314	400,246	345,953	1,287,513	92.4
<b>-6.0</b>	21	58	47	32	158	543,608	391,343	345,164	1,280,115	91.9

### 9.8.5 FY 2027 – EN y fases P11, P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-13: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11, P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Caso Escondida Norte + P11&P11s&N18 autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción	Producción Escondida	Producción	Total	
	Escondida N17&S4		Escondida P11&P11s&N18	Escondida Norte		Escondida N17&S4	P11&P11s&N18	Escondida Norte	[t]	[t]
Número de camiones con respecto a caso base	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E		[t]	[t]	[t]	[t]	
<b>Caso base</b>	20	53	30	52	155	511,544	345,296	458,089	1,314,928	96.3
<b>9.0</b>	20	56	34	56	166	494,074	355,111	469,278	1,318,463	96.5
<b>8.0</b>	20	55	33	56	164	494,051	355,111	469,278	1,318,440	96.5
<b>7.0</b>	20	55	32	55	162	494,051	353,086	469,278	1,316,415	96.4
<b>6.0</b>	20	55	32	54	161	494,051	353,086	466,780	1,313,917	96.2
<b>5.0</b>	20	54	32	54	160	478,950	353,086	466,780	1,298,816	95.1
<b>4.0</b>	20	54	31	54	159	478,950	354,954	466,780	1,300,684	95.2
<b>3.0</b>	20	54	31	53	158	478,950	354,954	464,154	1,298,058	95.0
<b>2.0</b>	20	53	31	53	157	478,361	354,954	464,154	1,297,469	95.0
<b>1.0</b>	20	53	30	53	156	478,361	354,358	464,154	1,296,874	94.9
<b>0.0</b>	20	53	30	52	155	478,361	354,358	459,504	1,292,224	94.6
<b>-3.0</b>	20	52	29	51	152	474,450	350,380	456,078	1,280,907	93.8
<b>-6.0</b>	20	51	28	50	149	468,795	346,736	451,988	1,267,520	92.8

## 9.8.6 FY 2027 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-14: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2027.**

Caso Escondida Norte + N17&S4 autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción Escondida P11&P11s&N18	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida Norte	Total	[% cumplimiento]
	Escondida P11&P11s&N18	Escondida N17&S4	Escondida Norte	Escondida Norte						
Número de camiones con respecto a caso base	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E		[t]	[t]	[t]	[t]	
<b>Caso base</b>	8	22	75	52	157	345,296	511,544	458,089	1,314,928	96.3
<b>6.0</b>	8	23	75	53	159	348,797	502,488	465,835	1,317,120	96.4
<b>5.0</b>	8	23	74	53	158	348,797	500,813	465,835	1,315,445	96.3
<b>4.0</b>	8	22	74	53	157	349,158	500,813	465,835	1,315,806	96.3
<b>3.0</b>	8	22	74	52	156	349,158	500,813	460,207	1,310,178	95.9
<b>2.0</b>	8	22	73	52	155	349,158	499,745	460,207	1,309,110	95.8
<b>1.0</b>	8	22	73	52	155	346,807	499,745	460,207	1,306,759	95.7
<b>0.0</b>	8	22	73	52	155	346,807	499,745	457,180	1,303,732	95.4
<b>-3.0</b>	8	21	72	51	152	339,772	496,319	450,402	1,286,494	94.2
<b>-6.0</b>	8	20	71	50	149	338,852	494,771	449,139	1,282,762	93.9

### 9.8.7 FY 2028 – EN y fases P11s y N18 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-15: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases P11s y N18 de Escondida autónomo, FY 2028.**

Caso Escondida Norte + P11s&N18 autónomo Número de camiones con respecto a caso base	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción Escondida N17&S4	Producción Escondida P11s&N18	Producción Escondida Norte	Total	
	Escondida N17&S4	Escondida P11s&N18	Escondida Norte	[t]		[t]	[t]	[t]	[% cumplimiento]	
	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E						
<b>Caso base</b>	20	53	42	46	161	487,603	353,047	457,761	1,298,410	95.2
<b>3.0</b>	20	54	43	47	164	467,104	361,627	477,280	1,306,011	95.8
<b>2.0</b>	20	53	43	47	163	464,888	361,627	477,280	1,303,795	95.6
<b>1.0</b>	20	53	43	46	162	464,888	361,627	472,987	1,299,502	95.3
<b>0.0</b>	20	53	42	46	161	464,888	355,083	472,987	1,292,958	94.8
<b>-3.0</b>	20	52	41	45	158	464,844	357,750	468,251	1,290,845	94.7
<b>-6.0</b>	20	51	40	44	155	465,561	354,818	467,962	1,288,341	94.5

### 9.8.8 FY 2028 – EN y fases S4 y N17 de Escondida en operación de manera autónoma

**Tabla N° 9-16: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida Norte y fases S4 y N17 de Escondida autónomo, FY 2028.**

Caso Escondida Norte + N17&S4 autónomo	Camiones manuales		Camiones autónomos		Total	Producción Escondida	Producción Escondida	Producción	Total	
	Escondida P11s&N18		Escondida N17&S4	Escondida Norte		P11s&N18	N17&S4	Escondida Norte	[t]	[t]
Número de camiones con respecto a caso base	KOM 960E	CAT 797	KOM 980E	KOM 980E		[t]	[t]	[t]	[t]	
<b>Caso base</b>	11	31	73	46	161	353,047	487,603	457,761	1,298,410	95.2
<b>3.0</b>	11	32	74	47	164	357,360	472,468	472,252	1,302,080	95.5
<b>2.0</b>	11	32	73	47	163	357,360	471,194	472,252	1,300,806	95.4
<b>1.0</b>	11	32	73	46	162	357,360	471,194	469,141	1,297,696	95.2
<b>0.0</b>	11	31	73	46	161	352,362	471,194	469,141	1,292,697	94.8
<b>-3.0</b>	11	30	72	45	158	347,242	467,860	469,918	1,285,020	94.3
<b>-6.0</b>	11	29	71	44	155	341,557	470,967	468,804	1,281,328	94.0

### 9.8.9 FY 2028 – EN y Escondida (2 sistemas) en operación de manera full autónoma

**Tabla N° 9-17: Análisis exploratorio de cantidad de camiones adicionales requeridos para alcanzar la producción del caso base en caso Escondida full autónomo, FY 2028.**

Caso Escondida Full autónomo	Camiones autónomos			Total	Producción Escondida	Producción Escondida	Producción	Total	
	Escondida P11s&N18	Escondida N17&S4	Escondida Norte		PI1s&N18	N17&S4	Escondida Norte	[t]	[t]
Número de camiones con respecto a caso base	KOM 980E	KOM 980E	KOM 980E		[t]	[t]	[t]	[t]	
<b>Caso base</b>	42	73	46	161	353,047	487,603	457,761	1,298,410	95.2
<b>0.0</b>	42	73	46	161	359,434	470,561	472,807	1,302,802	95.6
<b>-3.0</b>	41	72	45	158	362,611	472,865	472,093	1,307,570	95.9
<b>-6.0</b>	40	71	44	155	361,759	477,607	467,145	1,306,512	95.8
<b>-7.0</b>	40	71	43	154	361,759	480,900	467,145	1,309,805	96.1
<b>-8.0</b>	40	70	43	153	361,759	480,900	464,328	1,306,987	95.9
<b>-9.0</b>	39	70	43	152	357,499	480,900	464,328	1,302,727	95.6
<b>-10.0</b>	39	70	42	151	357,499	480,900	465,858	1,304,257	95.7
<b>-11.0</b>	39	69	42	150	355,404	480,900	465,858	1,302,162	95.5
<b>-12.0</b>	38	69	42	149	355,404	477,332	465,858	1,298,594	95.2