



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

# EVALUACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN DE OPERACIONES UNITARIAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

**CAMILO FARID SALVADOR COBO**

PROFESOR GUÍA:

**JAVIER RUÍZ DEL SOLAR SAN MARTÍN**

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

**LUIS FELIPE ORELLANA ESPINOZA**

**MAURICIO MASCARÓ MUÑOZ**

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE  
MINAS.

POR: CAMILO FARID SALVADOR COBO

FECHA: 17/01/2020

PROF. GUÍA: JAVIER RUÍZ-DEL-SOLAR

## EVALUACIÓN DE AUTOMATIZACIÓN DE OPERACIONES UNITARIAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Las minas de Block y Panel Caving tienen la necesidad de expandir el nivel de automatización de sus operaciones en orden de incrementar su productividad y disminuir el grado de exposición de sus trabajadores a condiciones de riesgo. La profundización de las operaciones mineras han causado un cambio en las condiciones geomecánicas de la operación generando un incremento de eventos a los cuales los trabajadores se ven expuestos (ej: estallidos de roca, desprendimiento de roca, etc.). Los problemas operacionales y de seguridad generados por estas nuevas condiciones de trabajo pueden abordarse mediante la automatización parcial o total de las operaciones. Sin embargo, las soluciones comerciales disponibles han abordado principalmente algunas pocas operaciones unitarias de la etapa de producción (automatización de equipos LHD y martillos reductores) y de transporte (automatización de camiones, trenes y correas transportadoras). Existen muchas otras operaciones unitarias y auxiliares para las cuales no hay soluciones comerciales disponibles de automatización.

Bajo este contexto, en esta investigación se presenta un análisis exhaustivo de las oportunidades de automatización de las operaciones unitarias y auxiliares en minas de Block y Panel Caving. Se consideran las operaciones unitarias y auxiliares relacionadas tanto con la preparación minera, como con la producción, mantenimiento de equipos e infraestructura, obras civiles y operaciones auxiliares.

Para llevar a cabo este estudio, primero se realiza un desglose de todas las operaciones realizadas en estas etapas estableciendo el nivel actual de automatización que presentan, para luego determinar el nivel de automatización que pueden obtener en un rango determinado de años, considerando la complejidad del desarrollo e implementación de la tecnología. Luego, se determina el nivel de exposición al riesgo del personal al realizar la operación y como se reduciría al automatizarla. Finalmente, considerando los costos asociados y el potencial beneficio en la producción, ahorro en tiempos de ciclo y seguridad, las operaciones más favorables a automatizar son seleccionadas. Para dichas operaciones, se realiza una evaluación cualitativa y cuantitativa del impacto global que representaría automatizar las actividades. Esta evaluación se basa en el potencial impacto en la seguridad operacional, eficiencia, impacto en producción y los costos asociados a ello.

## **Abstract**

Block and panel caving mines have the need to expand the automation level of their operations in order to increase their productivity and decrease the high degree of exposure of the workers to dangerous conditions. The deepening of mine operations has caused a change in the operation's geomechanical conditions generating an increase of dangerous events to which workers are exposed (e.g. rock bursts and rock falls). The operational and safety problems generated by these new working conditions can be addressed by the partial or total automation of the operations. However, the available commercial solutions have addressed mainly some few unit operations of the production level (automation of LHD and impact hammers) and the transportation level (automation of trucks, trains and conveyor belts). There exist many other unit and auxiliary operations for which there are no commercial available automation solutions.

In this context, this study presents an exhaustive analysis of the automation opportunities of unit and auxiliary operations in block/panel caving. The study considers unit and auxiliary operations related to mining preparation, production, maintenance, civil works and auxiliary support.

This study involves a series of activities in order to identify automation opportunities. First, for each task the level of automation to be obtained in a period of 4 and 6 years is determined considering its complexity. Then, for each task, the worker exposure and how this can be reduced through automation is determined. Finally, considering the associated costs and potential benefits in production, time savings and safety, the most favorable operations to be automated first are selected. For the selected unit/auxiliary operations, a quantitative and qualitative evaluation of their global impact on the operation is carried out. This evaluation is based on the potential impact on the operation's safety, efficiency, and associated production costs.

## **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a mis papas, mi madrina y mis tíos por todo el apoyo durante estos años.

Agradecer al Profesor Javier y a Mauricio por darme la oportunidad de trabajar en el laboratorio y realizar este trabajo de título. Al Profesor Luis por dar su apoyo y consejos durante este tiempo y acceder a ser parte de la comisión.

A mi polola, mis amigos del colegio y de la universidad que me acompañaron en todo durante este proceso y que sin su apoyo esto no hubiese sido posible.

Por último, agradecer al proyecto CONICYT/PIA AFB180004 por financiar este estudio.

# Tabla de Contenido

<b><u>1. INTRODUCCIÓN</u></b>	<b><u>1</u></b>
1.1 MOTIVACIÓN Y PROBLEMÁTICA	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 DESCRIPCIÓN POR CAPÍTULO	2
<b><u>2. ANTECEDENTES</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1 MÉTODO DE EXPLOTACIÓN BLOCK/PANEL CAVING	4
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO	4
2.1.2 LAYOUT DE LA MINA	5
2.2 PREPARACIÓN MINERA	6
2.2.1 DESARROLLOS HORIZONTALES	7
2.2.2 DESARROLLOS VERTICALES	9
2.2.3 INSTALACIÓN DE INFRAESTRUCTURA Y TI	11
2.3 OPERACIÓN MINA	11
2.3.1 SOCAVACIÓN	11
2.3.2 PRODUCCIÓN	11
2.3.3 TRASPASO	11
2.3.4 TRANSPORTE	11
2.3.5 INFRAESTRUCTURA	12
2.4 OPERACIONES AUXILIARES	12
2.4.1 OPERACIONES DE APOYO	12
2.4.2 OPERACIONES DE MANTENIMIENTO	12
2.4.3 OPERACIONES DE ABASTECIMIENTO	12
2.5 SEGURIDAD	12
2.6 AUTOMATIZACIÓN	18
<b><u>3. ANÁLISIS Y CATEGORIZACIÓN DE OPERACIONES</u></b>	<b><u>22</u></b>
3.1 PREPARACIÓN MINERA	22
3.1.1 MARCADO DE FRENTE	22
3.1.2 PERFORACIÓN DE AVANCE HORIZONTAL	22
3.1.3 LIMPIEZA DE ZAPATERA DE FRENTE	23
3.1.4 CARGUÍO DE EXPLOSIVOS	23
3.1.5 TRONADURA DE AVANCE HORIZONTAL	23
3.1.6 VENTILACIÓN	23
3.1.7 CHEQUEO DE FRENTE	23

3.1.8	FOTOGRAMETRÍA EN 3D	24
3.1.9	REGADO DE FRENTE	24
3.1.10	EXTRACCIÓN DE MARINA	24
3.1.11	ACUÑADURA MECANIZADA	25
3.1.12	PERFORACIÓN PERNO-CABLE	25
3.1.13	ANCLAJE PERNO-CABLE	25
3.1.14	INSTALACIÓN Y FRAGUADO DE PERNO-CABLE	26
3.1.15	INSTALACIÓN DE MALLA Y PLANCHUELA-TUERCA	26
3.1.16	APLICACIÓN DE <i>SHOTCRETE</i>	26
3.1.17	CONSTRUCCIÓN DE CAMA DE MINERAL	27
3.1.18	LIMPIEZA DE PISTA	27
3.1.19	HORMIGONADO DE PISTA	27
3.1.20	CARPETA DE RODADO	27
3.1.21	INSTALACIÓN MARCO EN VISERA	28
3.1.22	MARCACIÓN DE PERNOS <i>SPLIT-SET</i>	28
3.1.23	PERFORACIÓN DE PERNOS <i>SPLIT-SET</i>	28
3.1.24	INSTALACIÓN DE PERNOS <i>SPLIT-SET</i>	29
3.1.25	RED ELÉCTRICA	29
3.1.26	RED HÍDRICA	29
3.1.27	RED NEUMÁTICA	29
3.1.28	RED INALÁMBRICA PARA SISTEMAS AUTÓNOMOS/TELEOPERADOS	29
3.1.29	RAISE BORER DRILLING	30
3.1.30	BLIND HOLE DRILLING	30
3.2	OPERACIÓN MINA	<b>30</b>
3.2.1	PERFORACIÓN RADIAL PARA SOCAVACIÓN	31
3.2.2	MONEO	31
3.2.3	CARGUÍO DE EXPLOSIVOS EN TIROS RADIALES	31
3.2.4	TRONADURA DE TIROS RADIALES	31
3.2.5	CARGUÍO LHD	31
3.2.6	TRANSPORTE LHD	31
3.2.7	DESCARGA LHD	32
3.2.8	REDUCCIÓN MARTILLO MÓVIL	32
3.2.9	REDUCCIÓN MARTILLO FIJO (PRODUCCIÓN, TRASPASO Y TRANSPORTE)	32
3.2.10	LIMPIEZA DE CÁMARAS	32
3.2.11	TRANSPORTE POR FERROCARRIL	32
3.2.12	TRANSPORTE POR CORREAS	32
3.2.13	TRANSPORTE CON CAMIONES DE EXTRACCIÓN CAEX	33
3.2.14	INSTALACIÓN SISTEMA DE CONFINAMIENTO	33
3.3	OPERACIONES AUXILIARES	<b>34</b>
3.3.1	ACUÑADURA MECANIZADA	34
3.3.2	REDUCCIÓN SECUNDARIA CON MARTILLO MÓVIL	34
3.3.3	PERFORACIÓN PARA TRONADURA SECUNDARIA	34
3.3.4	CARGUÍO DE EXPLOSIVOS PARA TRONADURA SECUNDARIA	34
3.3.5	TRONADURA SECUNDARIA	34
3.3.6	LIMPIEZA DE PISTA	34
3.3.7	REPARACIÓN DE PISTA	35

3.3.8	MANTENIMIENTO DE INFRAESTRUCTURAS	35
3.3.9	MANTENIMIENTO DE REDES	35
3.3.10	MANTENIMIENTO DE BUZONES	35
3.3.11	MANTENIMIENTO DE EQUIPOS	36
3.3.12	MANTENIMIENTO DE MARTILLOS	36
3.3.13	INSUMOS	36
<b>4.</b>	<b><u>ANÁLISIS DE DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA AUTÓNOMA</u></b>	<b>38</b>
<b>5.</b>	<b><u>ANÁLISIS DE SEGURIDAD</u></b>	<b>46</b>
<b>6.</b>	<b><u>EVALUACIÓN DE IMPACTO EN LA PRODUCCIÓN POR OPERACIONES</u></b>	<b>56</b>
<b>7.</b>	<b><u>SELECCIÓN DE OPORTUNIDADES DE AUTOMATIZACIÓN</u></b>	<b>64</b>
<b>8.</b>	<b><u>EVALUACIÓN DE OPERACIONES SELECCIONADAS</u></b>	<b>81</b>
8.1	LHD PREPARACIÓN	83
8.2	CARGUÍO DE EXPLOSIVOS	89
8.3	PERFORACIÓN Y FORTIFICACIÓN DE PERNOS	91
8.4	PERFORACIÓN DE AVANCE	97
8.5	ANÁLISIS DE AUTOMATIZACIÓN DE CICLO OPERACIONAL	99
<b>9.</b>	<b><u>OPORTUNIDADES DE AUTOMATIZACIÓN DE ACTIVIDADES SECUNDARIAS</u></b>	<b>102</b>
9.1	SENSADO DE CONDICIONES AL INTERIOR MINA	102
9.1.1	CONTROL DE GASES	102
9.1.2	CONTROL DE HUMEDAD Y EVENTOS DE AGUA BARRO	103
9.2	INSPECCIÓN DE GALERÍAS ABANDONADAS	105
9.3	CHEQUEO DE PUNTOS DE EXTRACCIÓN	106
<b>10.</b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	<b>107</b>
<b>11.</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b>	<b>114</b>
<b>12.</b>	<b><u>ANEXOS</u></b>	<b>116</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1: Tipos de accidentes fatales y número de fatalidades asociadas. (Sernageomin, 2018) ..	17
Tabla 2: Límites permisibles de gases contaminantes (Ccatamayo, 2017).....	24
Tabla 3: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Operación.	40
Tabla 4: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Actividades Auxiliares. ....	41
Tabla 5: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Preparación Minera. ....	42
Tabla 6: Resumen de estado actual de automatización de las operaciones.....	43
Tabla 7: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de 0-4 años.....	44
Tabla 8: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de 4-6 años.....	45
Tabla 9: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de >6 años.....	45
Tabla 10: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Operación. ....	46
Tabla 11: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Preparación Minera. ....	47
Tabla 12: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Actividades Auxiliares. ....	48
Tabla 13: Categorización de Nivel de Riesgo Humano .....	49
Tabla 14: Número de operaciones por nivel de riesgo humano. ....	49
Tabla 15: Número y porcentaje de fatales por tipo de accidente.....	50
Tabla 16: Puntaje asociado a criterios C1 y C2 de Índice de Riesgo. ....	51
Tabla 17: Puntaje asociado a criterios C3 y C4 de Índice de Riesgo. ....	51
Tabla 18: Puntaje asociado a criterios C5 y C6 de Índice de Riesgo. ....	52
Tabla 19: Clasificación del nivel de riesgo operacional. ....	52
Tabla 20: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Operación. ....	53
Tabla 21: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Preparación Minera.....	54
Tabla 22: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Actividades Auxiliares.	55
Tabla 23: Clasificación de impacto en producción.....	57
Tabla 24: Rango de tonelaje involucrado por operación. ....	58
Tabla 25: Índice de impacto en producción proceso de Operación. ....	59
Tabla 26: Tiempo de ciclo por operación involucrada en sub-proceso Desarrollos Horizontales	60
Tabla 27: Tiempo de ciclo de operaciones pertenecientes al proceso Actividades Auxiliares ....	61
Tabla 28: Índice de impacto en producción operaciones pertenecientes al proceso Preparación Minera .....	62
Tabla 29: Índice de impacto en producción de operaciones pertenecientes a proceso de Actividades Auxiliares. ....	63
Tabla 30: Evolución de índice de riesgo promedio por sub-proceso.....	64
Tabla 31: Años para telecomandar y automatizar promedio por sub-proceso. ....	65
Tabla 32: Operaciones asociadas para evaluación, índice de riesgo/índice de impacto en producción. ....	73
Tabla 33: Operaciones asociadas para evaluación, años para telecomandar/automatizar. ....	74
Tabla 34: Operaciones tentativas para evaluar automatización.....	80
Tabla 35: Operaciones seleccionadas para evaluar su automatización. ....	81

Tabla 36: Número de operaciones por nivel de riesgo humano. ....	109
Tabla 37: Clasificación de impacto en producción.....	110
Tabla 38: Anexo Estimación en detalle de desarrollo e implementación de tecnología telecomandada .....	117
Tabla 39: Anexo Estimación en detalle de desarrollo e implementación de tecnología autónoma. .....	119
Tabla 40: Anexo cuantificación de intensidad de uso de personal por operación.....	121
Tabla 41: Evaluación de criterios de índice de riesgo por operación. ....	123
Tabla 42: Puntaje asignado por criterio para desarrollo de índice de riesgo.....	127
Tabla 43: Detalle de impacto en producción operaciones de preparación minera .....	130
Tabla 44: Detalle de operaciones asociadas para evaluación, índice de riesgo/índice de impacto en producción. ....	132

## Índice de Figuras

Figura 1: Vista Isométrica de los métodos de explotación Block y Panel Caving. (AtlasCopco, 1968). .....	4
Figura 2: Disposición de los niveles en mina de Block y Panel Caving, (Revuelta, 2011) .....	6
Figura 3: Ciclo de desarrollo horizontal de P&T. (Ccatamayo, 2017) .....	7
Figura 4: Fortificación de galería: Perno Helicoidal-Malla-Shotcrete. (Salvador, 2018).....	8
Figura 5: Layout de desarrollos horizontales Mina El Teniente. (Salvador, 2018).....	9
Figura 6: Excavación mecanizada mediante método Blind Hole. (Rabajille, 2017) .....	10
Figura 7: Excavación mecanizada mediante método Raise Borer. (Pozo, 2009).....	10
Figura 8: Tasa de accidentes del trabajo y de trayecto según actividad económica. (SUSESO, 2018) .....	13
Figura 9: Tasa de accidentabilidad en industria minera 2000-2018. (Sernageomin, 2018).....	14
Figura 10: Tasa de fatalidades en industria minera 2000-2018. (Sernageomin, 2018) .....	14
Figura 11: Trabajadores fallecidos acumulados del 2014 al 2018, por categoría de faena. (Sernageomin, 2018).....	15
Figura 12: Fallecidos desde el 2014 al 2018 por tipo de instalación (Sernageomin, 2018) .....	16
Figura 13: Porcentaje de fatalidades por tipo de accidente. (Sernageomin, 2018).....	18
Figura 14: Beneficios de la operación autónoma y remota (McNab & Garcia-Vasquez, 2011)...	20
Figura 15: Causas de costos asociados de una operación autónoma. ....	21
Figura 16: Perforación de avance horizontal con equipo Jumbo (Prensa Compument).....	22
Figura 17: Extracción de marina con equipo LHD (Crane and Machinery) .....	24
Figura 18: Acuñadura mecanizada (Induambiente).....	25
Figura 19: Equipo jumbo instalador de perno y malla (Rabajille, 2017).....	26
Figura 20: Aplicación de shotcrete (Neotecnica SAC Ingeniería) .....	27
Figura 21: Instalación de carpeta de rodado (Camhi, 2012) .....	28
Figura 22: Transporte por correas (Minería Chilena) .....	33
Figura 23: Índice de riesgo vs Años para automatizar por sub-proceso. ....	65
Figura 24: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Socavación. ....	66
Figura 25: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Producción. ....	67
Figura 26: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Transporte.....	67
Figura 27: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Traspaso.....	68
Figura 28: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Infraestructura. ....	68
Figura 29: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Desarrollos Horizontales. 69	
Figura 30: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Desarrollos Verticales. ...	69
Figura 31: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Instalación de Infraestructuras de Redes y TI.....	70
Figura 32: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Apoyo. ....	70
Figura 33: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Mantenimiento. ....	71
Figura 34: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Abastecimiento.....	71
Figura 35: Impacto en producción vs Años para telecomandar (0-4 años).....	76
Figura 36: Impacto en producción vs Años para telecomandar (4-6 años).....	77

Figura 37: Impacto en producción vs Años para automatizar (0-4 años).....	77
Figura 38: Impacto en producción vs Años para automatizar (4-6 años).....	78
Figura 39: Impacto en producción vs Años para automatizar (6< años).....	79
Figura 40: Redistribución de tareas en operación autónoma.....	83
Figura 41: Equipo LHD Caterpillar R1600H.....	85
Figura 42: Protocolo de operación para la extracción de marina (Geovita, 2015).....	86
Figura 43: Protocolo de operación para el carguío de explosivos (Geovita, 2015).....	90
Figura 44: Clasificación de pernos (Vallejos, 2012).....	91
Figura 45: Perno adherido por cemento (Burgos, 2015).....	92
Figura 46: Perno Split Set (Burgos, 2015).....	93
Figura 47: Protocolo de operación para la perforación de pernos helicoidales y Split Set (Geovita, 2015).....	94
Figura 48: Protocolo de operación para la lechada de pernos (Geovita, 2015).....	95
Figura 49: Jumbo apernador Epiroc Boltec M.....	96
Figura 50: Protocolo de operación para la perforación de avance horizontal (Geovita, 2015).....	98
Figura 51: Equipo de perforación jumbo Epiroc Boomer E.....	99
Figura 52: Ejemplo de automatización de ciclo minero.....	101
Figura 53: Sensor de gases inalámbrico (Salamanca, 2014).....	103
Figura 54: Situación de agua barro en mina Premier, Sudáfrica (Jakubec, et al., 2013).....	103
Figura 55: Matriz de peligro de bombeo de barro en puntos de extracción, Mina El Teniente (Pérez, 2017).....	104

## Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Tasa de accidentabilidad .....	13
Ecuación 2: Tasa de fatalidades.....	13
Ecuación 3: Índice de Riesgo .....	52
Ecuación 4: Índice de Impacto en Producción proceso de Operación. ....	57
Ecuación 5: Índice de Impacto en Producción procesos de Preparación Minera y Actividades	
Auxiliares. ....	57

# **1. Introducción**

## **1.1 Motivación y Problemática**

Las minas de Block y Panel Caving tienen la necesidad de expandir el nivel de automatización de sus operaciones en orden de mejorar la productividad de la operación y disminuir la exposición a condiciones de riesgo de sus trabajadores.

Las operaciones de minería subterránea presentan una gran cantidad de riesgos inherentes para el personal, principalmente riesgos asociados a la interacción del personal con grandes equipos mineros o de alta energía en lugares confinados, la localización de las zonas de trabajo en desarrollos subterráneos aislados sometidos a altos esfuerzos y un ambiente de trabajo industrial con una alta concentración de material particulado y gases en el aire.

La profundización de los yacimientos ha generado cambios en las condiciones geotécnicas del macizo rocoso dando como resultado que las operaciones se lleven a cabo en zonas de roca dura (roca primaria), de alta concentración de esfuerzos y de difícil acceso. Estas nuevas condiciones han generado un aumento en la frecuencia en la que ocurren situaciones de riesgo como lo son los eventos de estallido de roca, agua barro, desprendimiento de roca o material (planchones), los cuales afectan directamente la seguridad de las personas y ponen en riesgo la continuidad operacional de la mina.

Debido a la gran envergadura de las operaciones de Block y Panel Caving, estas presentan un alto grado de mecanización de sus distintas operaciones, permitiendo así un aumento en la productividad y seguridad de la operación. Gracias al alto nivel de mecanización que presentan las operaciones, la implementación de nuevas tecnologías o mejoras a las existentes utilizadas en la mina resulta más fácil que en otro tipo de operaciones mineras. Siendo la automatización de estas actividades una solución parcial o total a los problemas de seguridad y producción resultantes de los cambios en las condiciones del macizo rocoso, ya que permiten reducir la exposición del personal a situaciones de riesgo, aumentar el control y el manejo de la operación.

## **1.2 Objetivos**

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de esta memoria.

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo general de este estudio es llevar a cabo un análisis exhaustivo de las oportunidades de automatización para las distintas operaciones presentes en minas de Block y Panel Caving. Se consideran las operaciones unitarias y auxiliares relacionadas específicamente con las labores de operación mina (producción), preparación minera, mantenimiento de equipos e infraestructura, desarrollo de obras civiles y de soporte auxiliar.

## 1.2.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este estudio son:

- Identificar y desglosar todas las operaciones unitarias y auxiliares presentes en las etapas de preparación minera, operación mina, mantenimiento de equipos e infraestructura, obras civiles y de soporte auxiliar.
- Determinar el estado actual de automatización de cada una de las operaciones realizadas en las etapas de preparación minera, operación mina, mantenimiento de equipos e infraestructura, obras civiles y de soporte auxiliar.
- Determinar el potencial nivel de automatización al que pueden llegar cada una de las operaciones en un plazo acotado.
- Determinar el nivel de riesgo y exposición del personal que presenta cada una de las operaciones actualmente.
- Determinar que operaciones presentan un mayor beneficio potencial al aumentar su nivel de automatización, en base al impacto asociado en producción, seguridad y productividad total de la operación.
- Llevar a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo del impacto global que significaría automatizar las distintas operaciones tentativas.

## 1.3 Descripción por Capítulo

En esta sección se describe en forma breve el contenido de cada capítulo presente en esta memoria.

**El Capítulo 1** señala la problemática y motivación para realizar este estudio con el planteamiento del problema para posteriormente generar los objetivos para el desarrollo de este trabajo.

**El Capítulo 2** corresponde a los antecedentes de este trabajo, mostrando la revisión bibliográfica relacionada con el desarrollo de los objetivos del estudio. Se detallan los aspectos del método de explotación, la seguridad en la industria, las distintas etapas en las que están involucradas las operaciones y los antecedentes de automatización.

**El Capítulo 3** muestra el desglose de todas las operaciones realizadas en las distintas etapas de preparación minera, operación mina y las actividades auxiliares relacionadas a cada una.

**El Capítulo 4** muestra el desarrollo realizado para estimar la cantidad de años necesarios para telecomandar y automatizar cada una de las operaciones mencionadas. Se estima el estado actual de automatización que presenta cada operación para luego, en base a una serie de supuestos, estimar la cantidad de años necesarios para el desarrollo e implementación de la tecnología en la industria.

**En el Capítulo 5** se desarrolla un análisis de seguridad de cada una de las operaciones. Se cuantifica la intensidad de uso de personal que presenta cada operación y se categoriza el nivel de exposición al riesgo al cual se somete el personal al momento de realizar el trabajo, en base a ciertos supuestos operacionales. Finalmente se establece un índice de riesgo a partir de una serie de criterios operacionales definidos a partir de los estudios de accidentabilidad realizados previamente, para establecer el nivel de riesgo que presenta cada operación

**En el Capítulo 6** se estima el impacto en la producción que presenta cada operación de manera individual, lo cual luego será ocupado como uno de los criterios de selección para la automatización de las operaciones. Para ello se desarrolla un índice de impacto en la producción, basado en los indicadores clave de desempeño (*Key Performance Indicators, o KPI'S*) de cada operación, tomando en cuenta las diferencias entre las operaciones pertenecientes a la etapa de operación mina con las que pertenecen a las etapas de preparación minera y actividades auxiliares.

**En el Capítulo 7** se muestra el proceso de selección utilizado para estimar cuales de las operaciones son más atractivas para automatizar en base a la cantidad de tiempo mínima requerida para automatizarla, su nivel de seguridad y su impacto en la producción.

**En el Capítulo 8** se desarrolla una evaluación en detalle de las operaciones seleccionadas entre su estado actual y los cambios que se producirían al automatizar cada una de ellas.

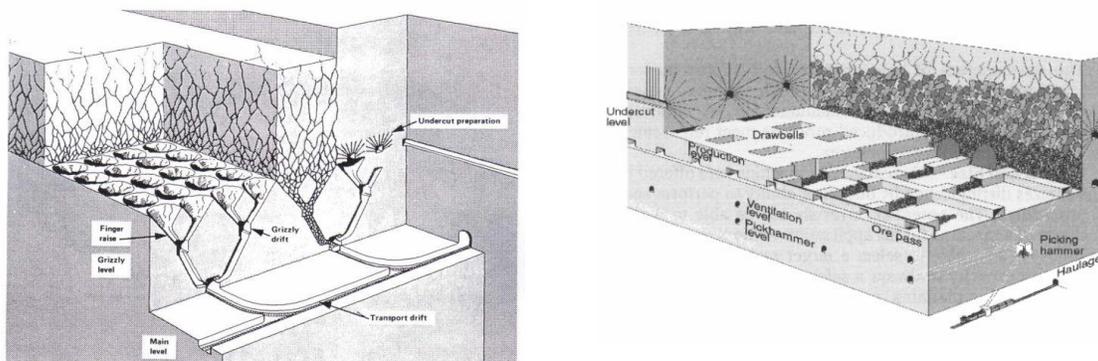
**En el Capítulo 9** se presentan una serie de operaciones puntuales que no pertenecen a ninguna de las etapas previamente descritas pero que debido al nivel de riesgo y exposición que presentan, la automatización de ellas se presenta como una solución para este problema. Por lo que se evalúa brevemente los beneficios que presentaría su automatización.

**El Capítulo 10** corresponde a las conclusiones y discusiones del trabajo realizado. Se detallan las evaluaciones realizadas y los resultados obtenidos en cuanto a la automatización de las operaciones, recomendaciones para la continuación de este estudio y trabajos futuros.

## 2. Antecedentes

### 2.1 Método de Explotación Block/Panel Caving

La explotación a través de Block Caving y su variante Panel Caving (Figura 1) se clasifica como una explotación subterránea por hundimiento. El método se basa en usar la acción de la gravedad junto con los esfuerzos internos de la roca para fracturar y hundir macizo, generando rocas de menor tamaño que pueden ser extraídas a través de operaciones mineras.



(a) Vista de Mina Block Caving.

(b) Vista de Mina Panel Caving.

Figura 1: Vista Isométrica de los métodos de explotación Block y Panel Caving. (AtlasCopco, 1968).

Este método de explotación presenta el menor costo de extracción en el campo de la minería subterránea. Esto se debe a que requiere de una menor cantidad de desarrollo (infraestructura) por tonelada extraída y también a que utiliza la acción de la gravedad principalmente para movilizar el mineral, reduciendo así significativamente los costos operacionales (Vergara, 2015). A causa de lo anterior, este tipo de explotación se desarrolla típicamente en yacimientos de dimensión y forma masivas. Por lo general estos yacimientos corresponden a del tipo pórfido, con una distribución de ley diseminada y que presentan una facilidad para el fracturamiento y hundimiento, siendo el tipo de roca necesariamente poco competente. El hundimiento se lleva a cabo mediante cortes basales de un bloque o panel, removiendo el punto de apoyo de la roca haciendo que esta sucumba a los esfuerzos internos generados y al efecto de la gravedad. (SME, 2011)

Para el caso de explotación a través de Block Caving es necesario desarrollar, previo a la producción, toda la infraestructura necesaria para extraer el bloque de mineral completo. En cambio, su variante de Panel Caving divide el bloque de mineral en distintos paneles y va desarrollando la infraestructura y desarrollos mineros a medida que la producción avanza, mediante un hundimiento progresivo de la roca. (Vergara, 2015)

#### 2.1.1 Descripción del Método

Una vez construidos los accesos a las zonas de interés mediante rampas o *skips*, se da inicio a la etapa de Preparación Minera en los niveles de hundimiento, producción, ventilación y transporte, lo cual implica el desarrollo de las excavaciones mineras, preparación de obras civiles, fortificación y montaje de infraestructura, siendo estas ejecutadas de manera secuencial en cada nivel para construir las excavaciones e infraestructura que soportarán la producción (SME, 2011).

Previo al hundimiento e inicio de la producción, es necesario desarrollar una cierta cantidad de área mínima preparada para que la roca efectivamente se fracture. La preparación del área varía según nivel, dependiendo de la cantidad de esfuerzos a la que serán sometidos los desarrollos y a la durabilidad que se requiere de ellos.

Desarrollada el área mínima, se procede con el hundimiento del macizo mediante la ruptura de las galerías del nivel de hundimiento a través de las operaciones de perforación y tronadura, generando así un corte basal del macizo y la socavación de éste.

A través del efecto de la gravedad y de la acumulación de esfuerzos internos generados al macizo, éste se fractura y hunde, siendo el mineral fracturado extraído a través de los puntos de extracción previamente desarrollados en el nivel de producción. El mineral es extraído de los puntos de extracción mediante el uso de equipos *Load-Haul-Dump* (LHD), para luego transportar el mineral al punto de vaciado, el cual según diseño puede variar entre un pique de traspaso o directamente a un chancador.

Por último, el mineral cae al nivel de transporte en donde será llevado al exterior a través del sistema de transporte implementado en la mina según su diseño, variando de transporte por correas, *skips*, ferrocarril o camiones (SME, 2011).

### **2.1.2 Layout de la Mina**

Las minas de Block y Panel caving están conformadas por una serie de niveles operativos horizontales, los cuales permiten la extracción eficiente del mineral aprovechando el efecto de la gravedad. A continuación se definen los cuatro principales niveles que presenta una mina de block y panel caving (Figura 2):

1. **Nivel de Hundimiento:** Nivel en donde se realiza el corte basal para lograr la socavación de la roca. Por lo general presenta una malla de mayor espaciado entre las galerías, siendo estas de menor dimensión que las de los otros niveles. Los desarrollos en este nivel no son fortificados de manera exhaustiva debido a que la vida útil requerida para este nivel es baja.
2. **Nivel de Producción:** Está ubicado bajo el nivel de hundimiento, formado por una serie de galerías denominadas “calles” y “zanjas”, las cuales están distribuidas según la malla de extracción diseñada. Se conecta con el nivel de hundimiento a través de bateas, a través de las cuales cae el mineral fracturado para luego ser transportado a los puntos de traspaso presentes en el nivel. Es el nivel que presenta la mayor cantidad de desarrollos y fortificación, debido a la gran cantidad de esfuerzos a los que son sometidas sus infraestructuras y la alta duración que se requiere de ellas.
3. **Sub-nivel de Ventilación:** Nivel que tiene como fin proporcionar ventilación a los demás niveles de la operación a través de chimeneas de inyección y extracción de aire y una serie de galerías, las cuales también son utilizadas como acceso a los demás niveles dando mayor flexibilidad a la operación.
4. **Nivel de Transporte:** Conjunto de desarrollos, montajes y obras civiles que permiten el manejo del mineral al exterior mina. Aquí se carga el mineral, que llega del nivel de producción, por intermedio de buzones a un sistema de transporte, determinado por el diseño de la mina, que lo conduce a la planta de chancado.

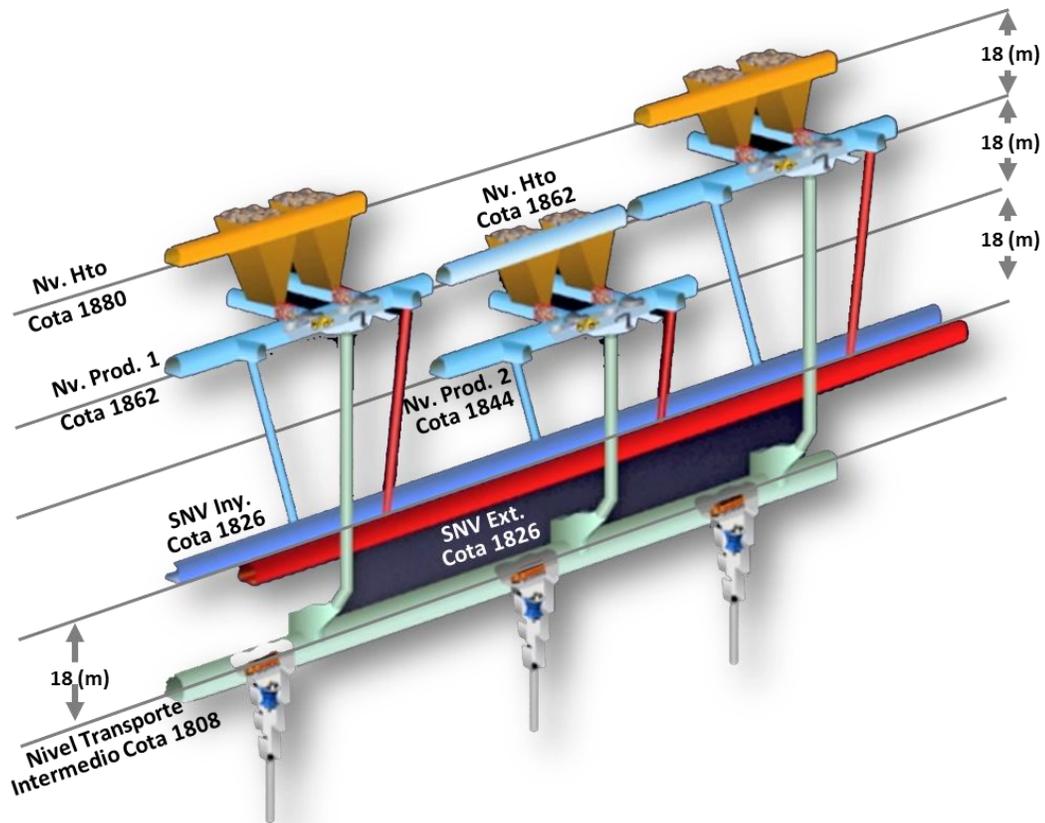


Figura 2: Disposición de los niveles en mina de Block y Panel Caving, (Revuelta, 2011)

## 2.2 Preparación Minera

En la etapa de preparación minera se gestionan las actividades relacionadas con el desarrollo y construcción de la infraestructura de la mina subterránea, a través del cumplimiento del programa de preparación que debe sustentar las áreas a incorporar necesarias para cumplir con el plan de producción minero. Esto se desarrolla con una visión sistemática que considera las diferentes fases de ejecución del proyecto, el alcance, plazo, costo y satisfacción del cliente, permitiendo asegurar los objetivos establecidos y contribuyendo a maximizar en el largo plazo el valor económico de la operación.

En detalle, es necesario manejar todas las actividades de desarrollo y construcción de infraestructuras mineras, mecánicas, eléctricas e instrumentación, utilizadas para incorporar un área productiva, tal que permita dar continuidad al proceso de explotación (Camhi, 2012). Los gastos generados en la etapa de preparación minera, sobre todo en una mina de Block y Panel Caving son considerablemente altos, por lo que la optimización de la operación es esencial para el desarrollo del proyecto.

Se establecen las siguientes áreas para caracterizar las etapas realizadas en la preparación minera:

- Desarrollos Horizontales.
- Desarrollos Verticales.
- Instalación de Infraestructura de redes y tecnologías de información (TI).

### 2.2.1 Desarrollos Horizontales

Los desarrollos horizontales consisten en todos los desarrollos de excavaciones e infraestructura que involucran el desarrollo de cruzados y conexiones en el nivel de hundimiento, calles y zanjas en el nivel de producción, galerías de ventilación en el subnivel de ventilación y galerías en el nivel de acarreo, además de cabeceras y accesos principales (Contreras, 2016). Los desarrollos horizontales son los que presentan la mayor cantidad de operaciones y el mayor volumen de desarrollo dentro de la mina.

El avance de los desarrollos horizontales se lleva a cabo según el ciclo operacional estándar de perforación y tronadura, el cual es desglosado en la Figura 3.

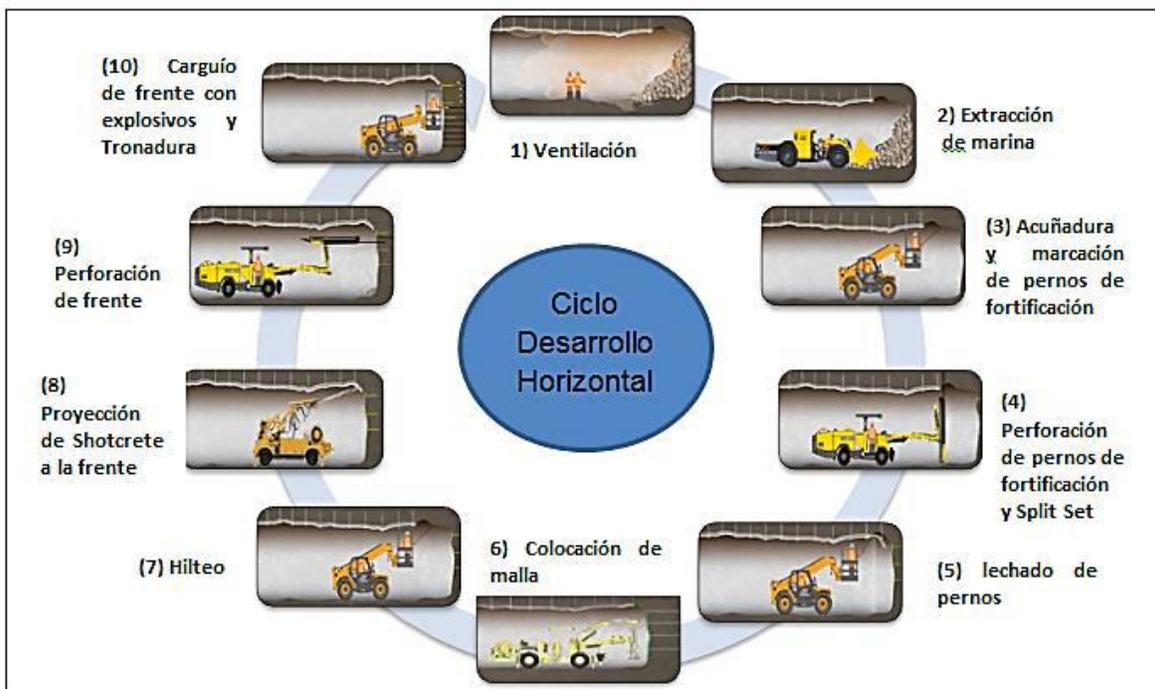


Figura 3: Ciclo de desarrollo horizontal de P&T. (Ccatamayo, 2017)

En la Figura 4 se puede apreciar un ejemplo de fortificación de galerías basada en la utilización de pernos, malla y *shotcrete*, la cual es utilizada generalmente en la minería subterránea.

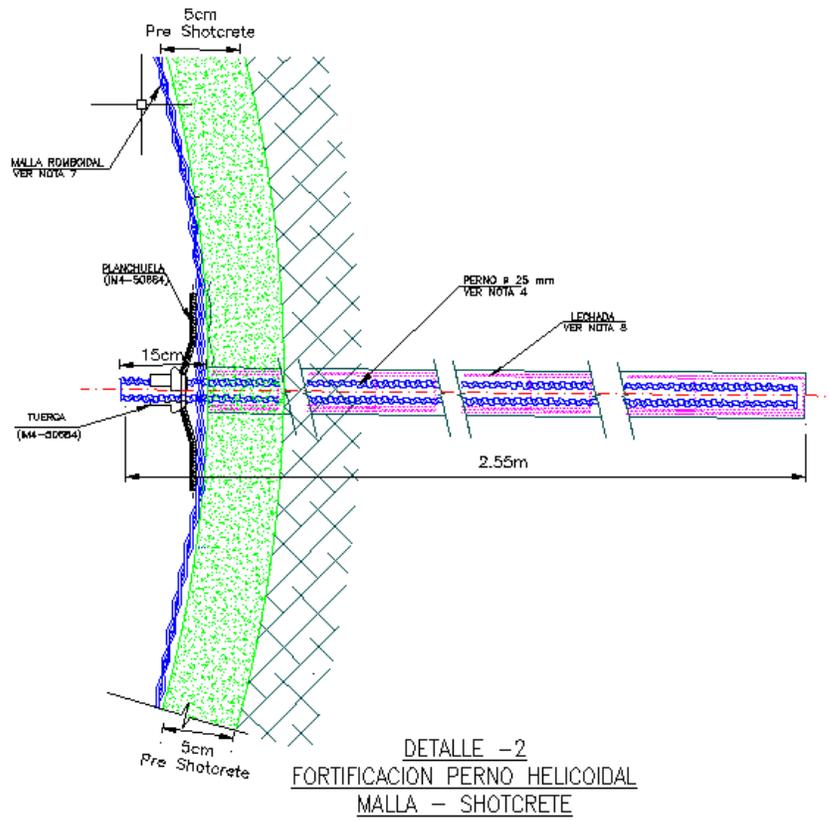


Figura 4: Fortificación de galería: Perno Helicoidal-Malla-Shotcrete. (Salvador, 2018)

En la Figura 5 se muestra el layout de la mina Dacita perteneciente a la mina El Teniente, en donde se puede apreciar la distribución de los desarrollos horizontales realizados en la mina según una malla del tipo Teniente utilizada en las minas de Block y Panel Caving.

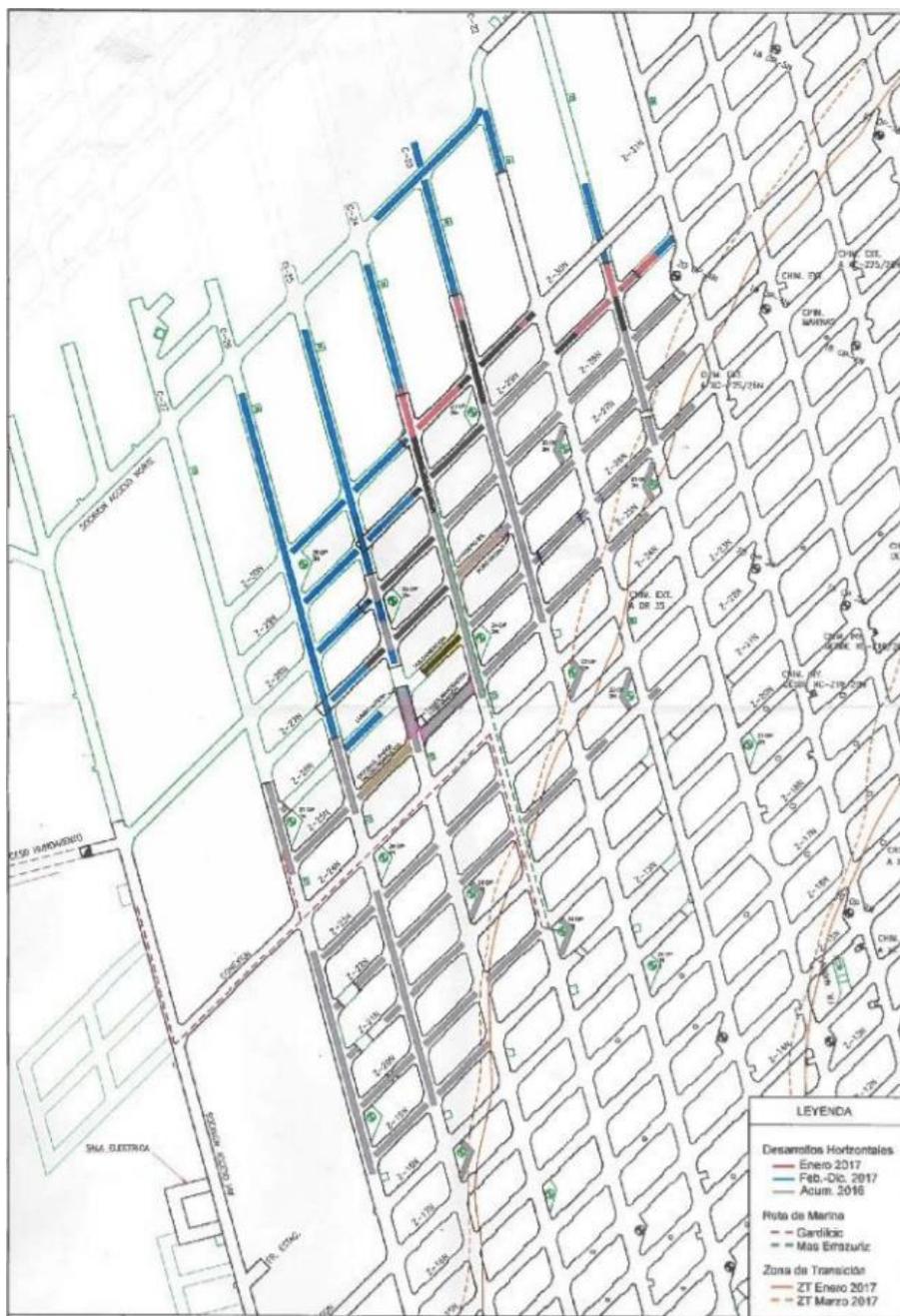


Figura 5: Layout de desarrollos horizontales Mina El Teniente. (Salvador, 2018)

## 2.2.2 Desarrollos Verticales

Las labores de desarrollo vertical hacen referencia a todos los desarrollos que implican la construcción de piques y chimeneas, que son utilizadas como puntos de extracción y piques de traspaso en el nivel de producción, chimeneas de ventilación o de transporte de personal.

Generalmente se utilizan los métodos de excavación mecanizada para este tipo de desarrollos debido a su mayor eficiencia y seguridad. Dependiendo de la ubicación y el diámetro de perforación requerido la perforación se puede realizar a través de los métodos de *Blind Hole Drilling* o *Raise*

*Borer Drilling.* En la Figura 6 y Figura 7 se puede apreciar un diagrama de la metodología de excavación de estos métodos.

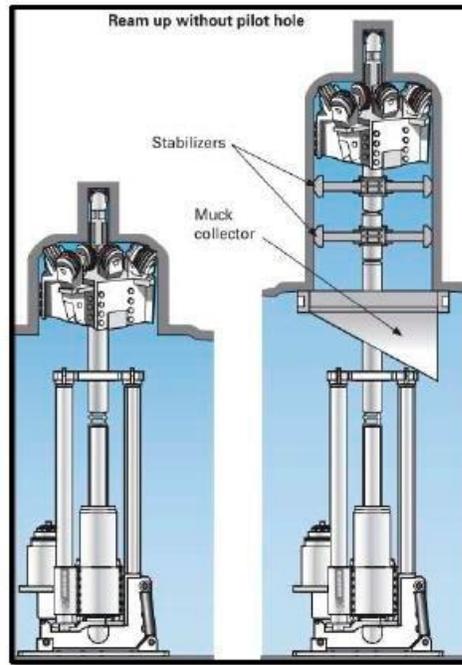


Figura 6: Excavación mecanizada mediante método Blind Hole. (Rabajille, 2017)

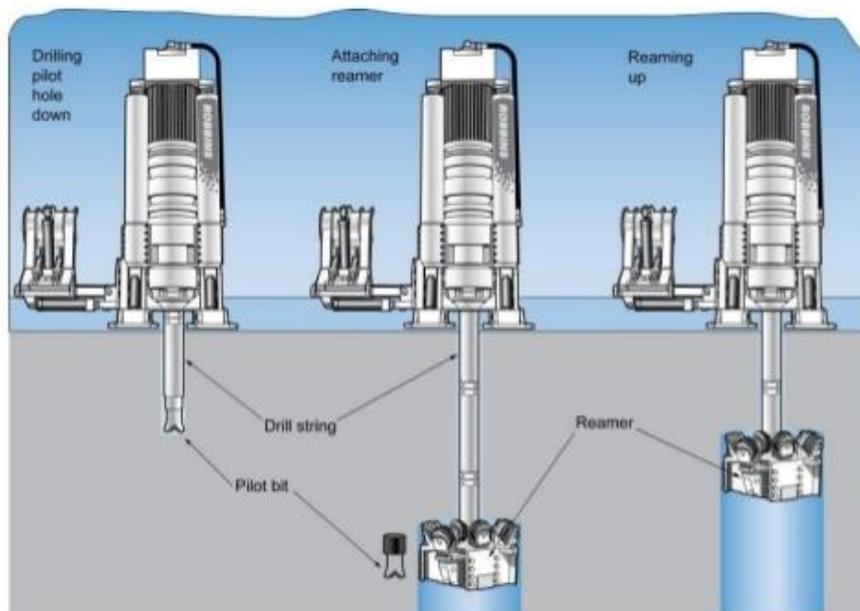


Figura 7: Excavación mecanizada mediante método Raise Borer. (Pozo, 2009)

### **2.2.3 Instalación de Infraestructura y TI**

Las operaciones mineras requieren de una serie de infraestructuras y redes para operar. Estas redes se enfocan en suministrar agua, electricidad, aire comprimido y señales de comunicación, las cuales son esenciales para realizar la operación, principalmente debido a que los equipos requieren de una serie de insumos para llevar a cabo sus operaciones individuales y de infraestructura que soporte las actividades realizadas. Estas redes son instaladas principalmente por los equipos de obras civiles y se distribuyen a lo largo de toda la operación.

## **2.3 Operación Mina**

La etapa de operación mina es definida como el conjunto de operaciones necesarias para la extracción del volumen o peso total de material que debe manejarse para cumplir los requerimientos definidos por el plan minero. En la minería de Block y Panel Caving esto involucra todas las operaciones desde el hundimiento hasta la extracción del mineral al exterior de la mina.

En esta etapa se gestionan las distintas combinaciones de equipos y secuencias de operación para poder cumplir con el plan minero (ton/año). Los principales factores en la definición de los equipos y del sistema o secuencia de extracción a realizar son la capacidad y el tiempo de ciclo que presentan los equipos según los parámetros establecidos por el diseño de la mina.

### **2.3.1 Socavación**

La socavación consiste en las actividades a realizar para generar el hundimiento del macizo rocoso. En la minería de Block y Panel Caving se lleva a cabo mediante un corte basal de la columna de mineral el cual induce el hundimiento.

### **2.3.2 Producción**

Las operaciones de producción hacen referencia específicamente a las operaciones realizadas en el nivel de producción, el cual basa su operación en el transporte de mineral desde los puntos de extracción hacia los piques de traspaso o al chancador respectivamente, mediante el uso de los equipos LHD.

### **2.3.3 Traspaso**

Las operaciones de traspaso son todas las actividades que se llevan a cabo para el transporte de mineral entre los niveles de producción y transporte, las cuales están directamente relacionadas con el transporte vertical del mineral a través de los piques de traspaso o al chancador respectivamente.

### **2.3.4 Transporte**

El transporte del mineral se lleva a cabo a través de distintos métodos. El método de transporte de mineral desde la interior mina hacia el exterior es elegido y diseñado según las distintas variables económicas y de diseño que presenta la mina, pudiendo variar entre transporte por ferrocarril, correas o camiones de extracción de mineral.

### **2.3.5 Infraestructura**

Para la realización de las distintas operaciones autónomas o telecomandadas es necesario la instalación de infraestructuras de protección y aislación consideradas como barreras duras. Estas son necesarias para la realización de las actividades ya que la tecnología actual no permite una interacción completa entre estos sistemas y las demás operaciones en la mina, poniendo en riesgo al personal y los demás equipos que estén realizando operaciones cercanas a la zona autónoma.

## **2.4 Operaciones Auxiliares**

Las operaciones auxiliares son todas aquellas operaciones que no están relacionadas directamente con la producción pero que cumplen un rol de apoyo y de soporte para la realización de ella. Se basa principalmente en el mantenimiento de los equipos e infraestructura, junto con las operaciones de apoyo necesarias para realizar correcciones en la operación.

### **2.4.1 Operaciones de Apoyo**

En una operación de mina subterránea existen una serie de operaciones de apoyo, las cuales tienen como función corregir o reparar cualquier resultado o evento repentino el cual no haya sido previamente planificado.

### **2.4.2 Operaciones de Mantenimiento**

La operación de mantenimiento hace referencia como el nombre lo indica, al mantenimiento de tanto de los equipos e infraestructuras utilizados en las etapas de preparación minera y producción.

En todas las áreas el uso de equipos y el estado de la infraestructura es esencial para el desarrollo eficiente del proyecto, por lo que la correcta gestión de ellos es primordial para la operación. Para ello se realizan mantenciones programadas a los equipos e infraestructura de manera periódica según lo indicado por el proveedor de ellos, al igual que mantenciones o reparaciones no programadas las cuales se realizan al momento de algún imprevisto causado por una falla mecánica u operacional de ellos.

Los equipos fijos, martillos picadores o ventiladores, no pueden ser retirados de su zona de trabajo por lo que tienen que ser mantenidos o reparados dentro de la operación. Los equipos móviles como lo son los LHD o Jumbo son llevados a los talleres mecánicos, que se encuentran en una zona externa a la operación para realizar las mantenciones.

### **2.4.3 Operaciones de Abastecimiento**

Los equipos utilizados en la operación utilizan una gran cantidad de insumos (ej: aceros, petróleo, energía, etc.) para lo cual es necesario mantener un suministro constante y efectivo de estos en la operación.

## **2.5 Seguridad**

En los años recientes la industria minera ha consolidado la seguridad como uno de sus valores principales, incluyéndola como uno de sus ejes de acción. La seguridad en la industria ha ido

mejorando a través de los años gracias al desarrollo de nuevas tecnologías, una mejora en los protocolos de seguridad y en los de operación en faena (McNab y Garcia-Vasquez, 2011). Se ha implementado en la industria una cultura de seguridad, con énfasis en los procesos de inducción y capacitación de trabajadores, a lo que se suma la implementación de sistemas de gestión de seguridad (Fisher y Schnitteger, 2011).

Los principales indicadores utilizados en la industria son la *Tasa de Accidentabilidad* y la *Tasa de Fatalidades*. Estos indicadores muestran la tasa de accidentes incapacitantes (cuya lesión da como lugar a descanso y ausencia justificada al trabajo) y fatalidades generados en los trabajos. La industria minera presenta las tasas más bajas dentro de las actividades económicas del país (SUSESO, 2018), esto se puede apreciar en la Figura 8. En la Ecuación 1 y Ecuación 2 se detalla la forma de cálculo de las tasas de accidentabilidad y fatalidades.

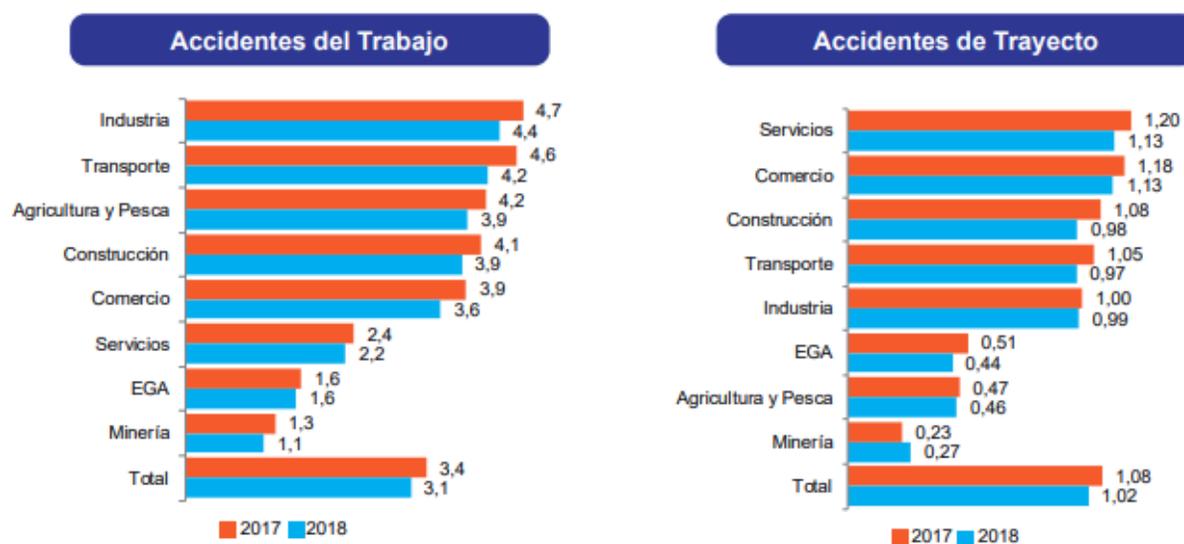
Ecuación 1: Tasa de accidentabilidad

$$\text{Tasa de Accidentabilidad} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de Accidentes Incapacitantes}}{\text{Millón de Horas Personas Trabajadas}}$$

Ecuación 2: Tasa de fatalidades

$$\text{Tasa de Fatalidades} = \frac{\text{N}^\circ \text{ de Trabajadores Fallecidos}}{\text{Millón de Horas Personas Trabajadas}}$$

### Tasa de Accidentes del Trabajo y de Trayecto según Actividad Económica. Mutualidades, 2017-2018.



Nota: Tasas por cada 100 trabajadores protegidos.  
Fuente: Boletines Estadísticos, Superintendencia de Seguridad Social.

Figura 8: Tasa de accidentes del trabajo y de trayecto según actividad económica. (SUSESO, 2018)

En la Figura 9 y la Figura 10 se puede apreciar la evolución de la tasa de accidentabilidad y la tasa de fatalidades en la industria a través de los años. La tasa de accidentabilidad y la tasa de fatalidades en la industria han disminuido alrededor de un 78% entre los años 2000 a 2018, siendo esta una reducción significativa por parte de ambas tasas pero que todavía no logra el objetivo de la industria en general el cual es de presentar una operación con cero accidentes y fatalidades.

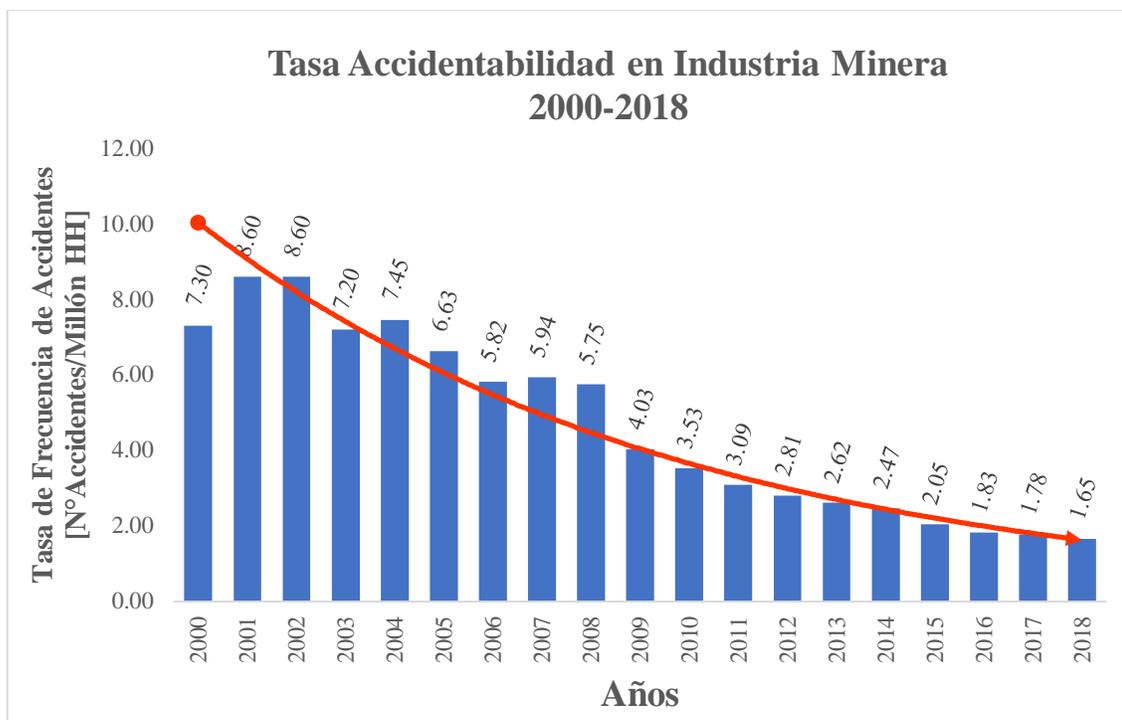


Figura 9: Tasa de accidentabilidad en industria minera 2000-2018. (Sernageomin, 2018)

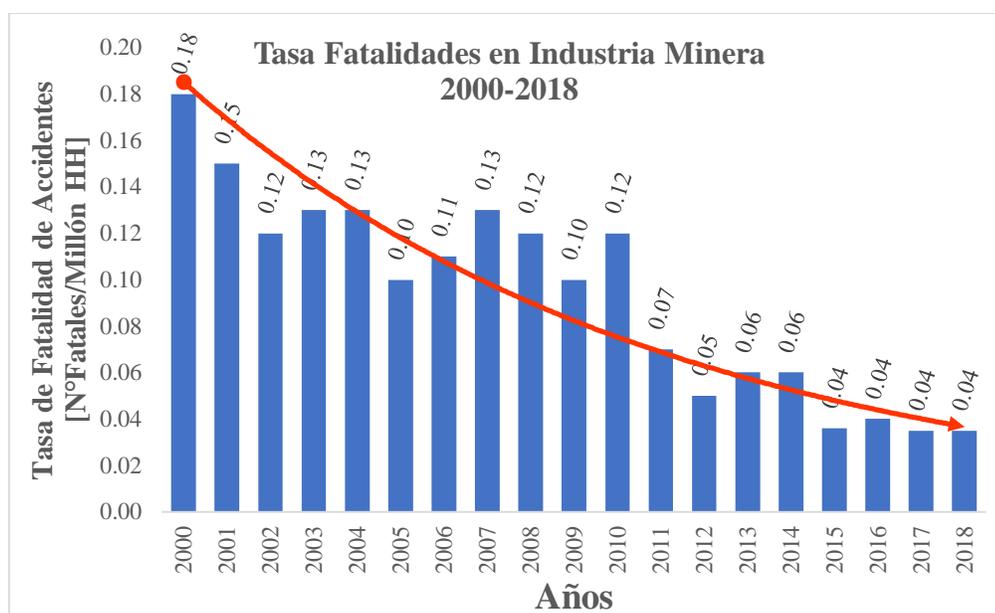


Figura 10: Tasa de fatalidades en industria minera 2000-2018. (Sernageomin, 2018)

En la Figura 11 se puede apreciar que, de un total de 91 fatales, entre los años 2014 a 2018, 41 ocurrieron en faenas clasificadas como Gran Minería, las cuales corresponden a faenas en las que trabajen un número igual o superior a 400 personas. En cuanto a la Figura 12 se establece también que de los 91 fatales ocurridos en ese periodo de tiempo, 40 fueron causados en faenas de minería subterránea. Siendo las operaciones mineras de block y panel caving pertenecientes a estas dos categorías.



Figura 11: Trabajadores fallecidos acumulados del 2014 al 2018, por categoría de faena. (Sernageomin, 2018)

**FALLECIDOS DESDE EL 2014 AL 2018**  
Por tipo de instalación

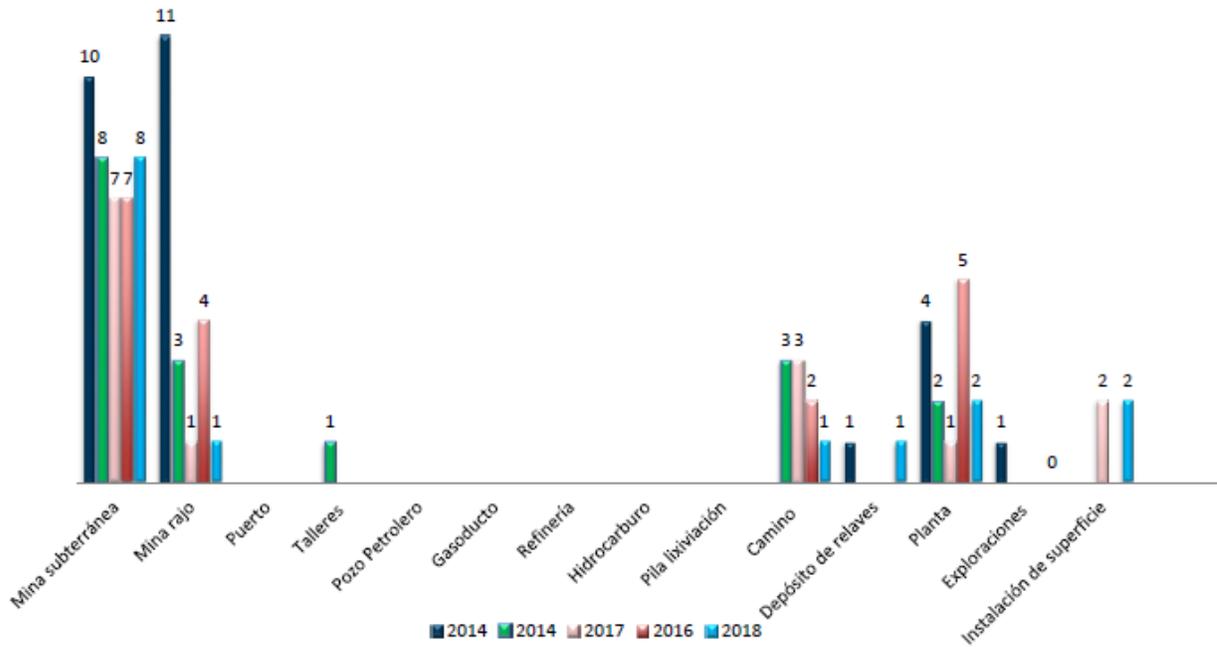


Figura 12: Fallecidos desde el 2014 al 2018 por tipo de instalación (Sernageomin, 2018)

En la Tabla 1, se muestra una clasificación de los distintos tipos de accidentes presentes en la industria minera, junto con el número de fatalidades asociados a cada uno durante el periodo de los años 2014 a 2018. En la Figura 13 se puede ver el porcentaje que cada accidente representa dentro de las fatalidades ocurridas en este período de tiempo.

Tabla 1: Tipos de accidentes fatales y número de fatalidades asociadas. (Sernageomin, 2018)

<b>Accidentes Fatales</b>	<b>Nº de Fatalidades</b>	<b>Descripción de Accidente</b>
Golpeado por roca	30	Accidentes cuya causa inmediata sea la caída de roca, incluyendo los derrumbes y colapso por subsidencias.
Equipos	8	Accidentes cuya causa inmediata está asociada a la participación de un equipo minero.
Transporte	14	Accidentes cuya causa inmediata está asociada a la participación de un equipo de transporte, como transporte de mineral, transporte de personal, etc.
Caída de altura	14	Accidentes cuya causa inmediata corresponda a la caída de diferente nivel de altura.
Apretado	8	Accidentes cuya causa inmediata sea el aprisionamiento del cuerpo o parte de él.
Tronadura	3	Accidentes cuya causa inmediata
Ingestión	2	Accidente cuya causa inmediata sea la ingestión de líquidos, toxico y no toxico.
Caída de mismo nivel	1	Accidentes cuya causa inmediata corresponde a la caída del mismo nivel de altura.
Electrocución	2	Accidentes cuya causa inmediata sea el contacto con energía eléctrica.
Explosión	2	Accidentes cuya causa inmediata sea la explosión de aparato a presión, acumulaciones de gases o explosiones generadas por explosivos excluyendo la tronadura.
Golpeado por	6	Accidentes cuya causa inmediata sea producto al golpe causado por el impacto de algo material a una persona.
Temperatura	1	Accidentes cuya causa inmediata sea el contacto con temperatura.
Total	91	

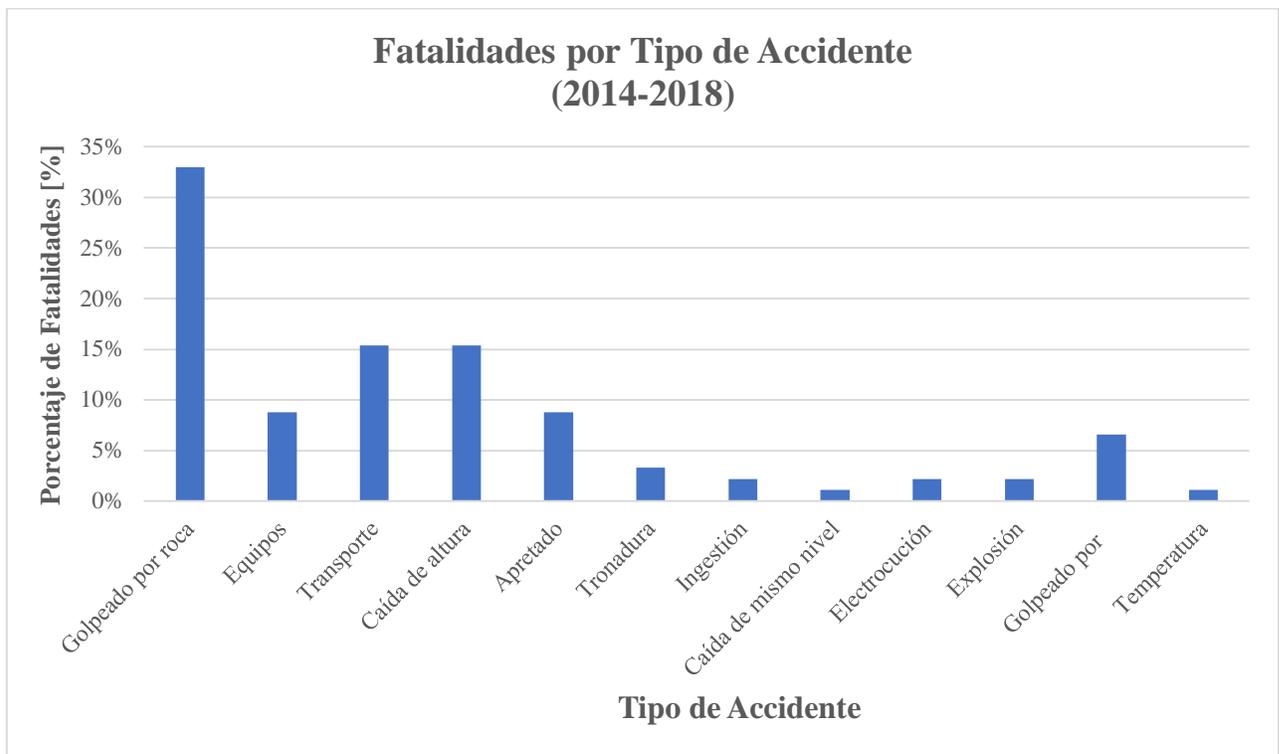


Figura 13: Porcentaje de fatalidades por tipo de accidente. (Sernageomin, 2018)

## 2.6 Automatización

El término “automatización” hace referencia al reemplazo parcial o total en una función previamente desarrollada por un operador humano, física o mentalmente, siendo el principal objetivo de la automatización el de “controlar el comportamiento de sistemas dinámicos y emular la máxima capacidad física e intelectual humana para mejorar la productividad de un proceso a través de un aumento en la precisión de las actividades realizadas” (McNab & Garcia-Vasquez, 2011).

El desarrollo de las tecnologías de automatización depende de los avances en otras áreas de ingeniería de información y comunicación, las cuales son:

- Tecnología de comunicación: Desarrollo de tecnologías que permiten la transmisión de gran cantidad de datos sobre grandes distancias y con un nivel de confiabilidad.
- Tecnología de detección: Desarrollo de tecnologías de detección que son lo suficientemente robustas para operar en el entorno de la mina y que se utilizan para monitorear el estado del equipo, la operación y su ubicación.
- Tecnología de navegación: Desarrollo de tecnologías de navegación que permiten que el equipo sea consciente de su ubicación y del entorno.

Esto se debe a que todos los procesos están sometidos a una serie de variables impuestas por el ambiente de trabajo en donde se realiza, por lo que el equipo automatizado debe estar “consiente” de su entorno y de los cambios que van sucediendo. Un proceso puede alcanzar distintos grados de automatización los cuales se clasifican como (The Royal Academy of Engineering, 2009):

- **Control directo:** El personal humano posee control total o parcial.
- **Supervisado:** El equipo hace lo que el operador comanda, pero en la cual no está involucrado directamente.
- **Automático:** El equipo lleva a cabo procesos fijos pre-definidos por el operador, pero sin intervención de este.
- **Autónomo:** El equipo lleva a cabo procesos de diseño, pero este se puede adaptar y tomar decisiones en el proceso.

Cada nivel implica un aumento en los niveles de automatización de la operación y una disminución de la intervención humana, siendo estos niveles definidos a partir de una combinación de inteligencia e independencia que presenta el equipo.

En las operaciones mineras la automatización de las operaciones va de la mano con las operaciones del tipo remoto, traduciéndose en un control o monitoreo de la operación en estaciones remotas de trabajo. A partir de esto y de los grados de automatización previamente mencionados se definen los siguientes grados de automatización para las operaciones mineras:

- **Manual:** La operación es realizada con una intervención humana del 100%, con los operadores presentes en faena.
- **Telecomandada:** La operación es realizada con una intervención humana del 100%, con los operadores localizados en un centro de control remoto a la faena.
- **Autónoma:** La operación es realizada sin necesidad de intervención humana. Los operadores están limitados al monitoreo, la supervisión de los equipos y de las variables relacionadas a la operación, pero no se involucran en ella.

En base a las operaciones remotas, se ha logrado crear un ambiente de trabajo seguro para los operadores como también el logro de una centralización de funciones que en faena se encuentran separadas, permitiendo así una integración de la información más rápida haciendo la supervisión de la operación más fácil (McNab & Garcia-Vasquez, 2011).

La reducción de la variabilidad de los resultados obtenida al automatizar las operaciones junto a los beneficios de integración y gestión de información entregados por el desarrollo de una operación remota, permite que se pueda ver la operación del sistema de procesos mineros como un todo, facilitando el control, la supervisión y la toma de decisiones optimizando así la operación. Esta relación se puede ver en la Figura 14.



Figura 14: Beneficios de la operación autónoma y remota (McNab & Garcia-Vasquez, 2011).

La automatización actual de las operaciones mineras es motivada por los cambios en las condiciones que presentan los yacimientos minerales, incrementar la eficiencia, mejorar la productividad y la seguridad de los trabajadores (Rio Tinto, 2008). De las 15 principales tendencias en la automatización de operaciones mineras 7 se basan en mejorar la seguridad de los trabajadores y 8 en mejorar la productividad de la operación a realizar (Fischer & Schutteger, 2011).

La experiencia adquirida en las aplicaciones industriales indica que para obtener los mismos resultados operacionales que las operaciones manuales, no basta simplemente reemplazar los equipos por equipos telecomandados o automatizados. Se requiere de un rediseño del proceso de extracción, en particular el agendamiento y las interferencias generadas las cuales son parte inherente del proceso (Fishwick & Telias, 2014). El rediseño de la operación se debe a que las operaciones telecomandadas y autónomas requieren de una serie de nuevas infraestructuras, redes y protocolos de trabajo que no son totalmente homologables con los procesos de preparación y extracción tradicionales. Estos cambios generan nuevas fuentes de costos dentro de la operación que tienen que ser considerados al implementar la tecnología, esta relación se muestra en la Figura 15.

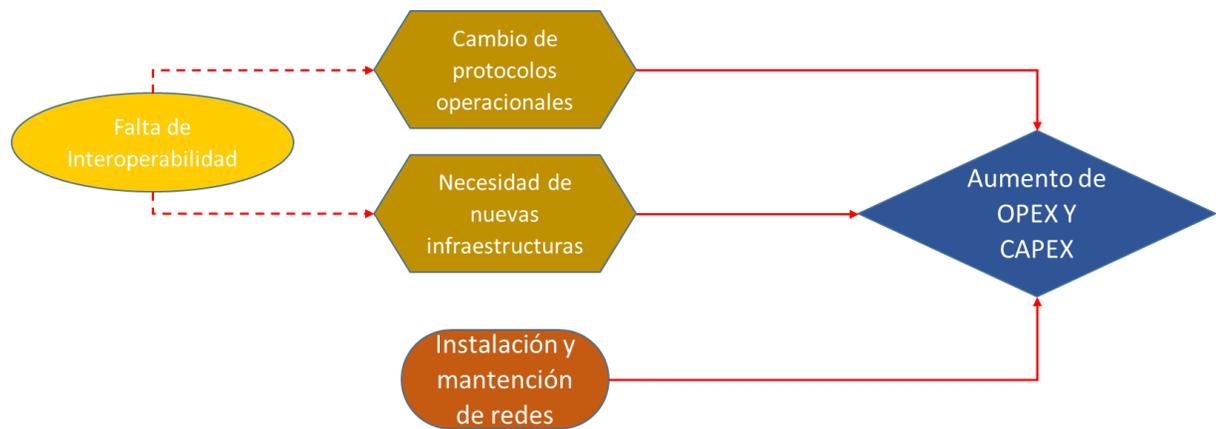


Figura 15: Causas de costos asociados de una operación autónoma.

La tecnología actual solo permite que las operaciones telecomandadas y autónomas operen en zonas aisladas de trabajo impidiendo la interacción con otros equipos o personal. Esto genera una baja en la flexibilidad de la operación provocando que las operaciones disminuyan su productividad. El objetivo actual de la industria es lograr que este tipo de operaciones telecomandadas y autónomas incrementen su interoperabilidad, lo que consiste en que los equipos de distintas operaciones y el personal puedan interactuar de manera colaborativa, flexible y sinérgica en base a la planificación minera y el diseño de la operación (Ruiz-del-Solar, Widzyk-Capehart, Vallejos & Asenjo, 2014).

### **3. Análisis y Categorización de Operaciones**

A partir de la caracterización de las actividades según etapa operacional (preparación minera, producción o auxiliares) se lleva a cabo un desglose en detalle de todas las operaciones realizadas en cada etapa.

#### **3.1 Preparación Minera**

A continuación, se detallan las operaciones y actividades realizadas en la etapa de preparación minera. Se consideran todas las operaciones involucradas en los desarrollos horizontales, desarrollos verticales y en la instalación de infraestructura y redes.

##### **3.1.1 Marcado de Frente**

Operación que consiste en el marcado (con pintura) de la malla de perforación en la frente de desarrollo, para que luego pueda ser perforada de manera correcta por el equipo de perforación.

##### **3.1.2 Perforación de Avance Horizontal**

Operación que consiste en perforar el diagrama de disparos horizontal en la frente de avance. Se lleva a cabo mediante la utilización de un equipo de perforación Jumbo (Figura 16), el cual puede tener una cantidad variable de brazos dependiendo de los requisitos de la operación. El equipo utiliza un motor diésel para su movilización, un motor eléctrico para realizar la perforación y agua para limpiar el detritus. El equipo de trabajo consiste en el operador del Jumbo y un electromecánico, los cuales son responsables de la operación del equipo, la habilitación de energía eléctrica (tendido del cable, procedimiento de conexión y puesta en marcha) y la instalación de la bomba de drenaje.

La operación inicia primero al confinar el sector de trabajo, para luego proceder con la instalación del Jumbo en la frente de avance. Una vez en la frente, el Jumbo se posiciona utilizando gatos estabilizadores y se realiza la conexión a la red hídrica y eléctrica. Luego se procede con la perforación de la frente. Cuando se finaliza la perforación de la frente, se desinstalan las redes eléctricas e hídricas del equipo, para luego retirar el equipo de perforación.



*Figura 16: Perforación de avance horizontal con equipo Jumbo (Prensa Compument)*

### **3.1.3 Limpieza de Zapatera de Frente**

Operación que consiste en la limpieza de la zapatera de la frente. Luego de la perforación de la frente, los tiros de zapatera quedan cubiertos por material por lo que es necesario limpiarlos previo al carguío de explosivos.

La operación se realiza mediante el uso de un equipo LHD el cual se introduce en la frente de avance y retira el material remanente en la zapatera.

### **3.1.4 Carguío de Explosivos**

Esta actividad consiste en cargar los tiros perforados previamente con explosivos para poder realizar la tronadura en la frente de avance. Para ello se requiere de personal calificado para la manipulación, carguío y transporte de explosivos, una camioneta debidamente acondicionada para el transporte de explosivos, una grúa con jaula con techo protector y malla de seguridad para la protección del personal que realiza el carguío en la frente y un cargador de explosivos eléctrico.

La operación inicia con la limpieza previa de los tiros mediante la inyección de aire a presión en todas las perforaciones para eliminar el agua y detritus remanente, los cuales impiden una carga eficaz del explosivo. Luego se procede al carguío de la frente, el cual lo realiza el personal de manera manual mediante el uso de la grúa para movilizarse a través de los tiros.

Se finaliza la operación con la conexión de todos los tiros mediante los detonadores respectivos para luego retirar todos los equipos y personal presente en la frente de avance

### **3.1.5 Tronadura de Avance Horizontal**

La tronadura consiste en la detonación de los explosivos cargados en la frente de avance. Para ello, el jefe de nivel junto con el equipo de tronadura coordina y establecen la aislación completa del sector y de los alrededores mediante el uso de barreras físicas (ej: loros metálicos) para asegurar que no exista ninguna interferencia con otra operación o que afecte a personal presente en las cercanías. Por lo general está operación se lleva a cabo en los cambios de turno en donde no hay personal presente en faena.

### **3.1.6 Ventilación**

Posterior a la tronadura de la frente, se debe esperar como mínimo 30 minutos antes de autorizar el ingreso a la zona de trabajo, para así verificar que la concentración de gases tóxicos cumpla con los estándares de seguridad establecidos. La ventilación de la frente se lleva a cabo mediante el uso de ventiladores eléctricos, los cuales son instalados en la zona de trabajo según lo especifica el diseño de ventilación de la mina, y que son controlados de manera remota. Por norma, las mangas de ventilación tienen que estar ubicadas a no más de 30 metros de la frente de avance.

### **3.1.7 Chequeo de Frente**

El procedimiento de chequeo de gases es realizado por el jefe de turno junto con un equipo de personas calificadas utilizando detectores de gases debidamente calibrados. La actividad tiene como objetivo revisar que la concentración de gases tóxicos remanentes generados por la tronadura sea igual o menor a los límites establecidos por las normas de seguridad, también es necesario chequear que la concentración de oxígeno debe ser como mínimo 19,5% para que se pueda habilitar

el área de trabajo. En la Tabla 2 se muestran los límites en cuanto a la concentración de los gases tóxicos resultantes de la tronadura.

Tabla 2: Límites permisibles de gases contaminantes (Ccatamayo, 2017)

Gas Tóxico	Concentración
Monóxido de Carbono (CO)	40 ppm
Dióxido Nitroso (NO <sub>2</sub> )	2,4 ppm

### 3.1.8 Fotogrametría en 3D

Se procede a tomar fotos geo-referenciadas del frente previo a su fortificación con el objetivo de obtener información geológica y topográfica de la zona. Esto permite analizar las condiciones y si producto de la tronadura se generó sobre o sub-excavación de la galería. Esta operación también permite diagnosticar el estado de las infraestructuras presentes, indicando si necesitan reparaciones o rehabilitación de algún tipo.

### 3.1.9 Regado de Frente

Previo a la extracción de la marina de la frente, es necesario regarla para disipar la cantidad de finos presentes en el aire y disipar las concentraciones de gases tóxicos remanentes, permitiendo tener un proceso de extracción de marina más efectivo y seguro.

### 3.1.10 Extracción de Marina

Operación la cual consiste en transportar la roca fragmentada producto de la tronadura, mediante el uso de un equipo LHD (Figura 17), a un sector de acopio o de descarga (piques de traspaso o chancador) para así retirarla de la frente de avance y poder continuar con los desarrollos.

La zona de trabajo y de descarga de la marina se define previamente en la programación del turno y de ruta de marina. Primero el jefe de nivel y el encargado de marinas evalúan la zona de trabajo en búsqueda de posibles riesgos o inconvenientes a la operación (limpieza, colpas, rocas, materiales y equipos). Luego, el operador del equipo LHD procede a verificar la ruta de marina para luego confinar el área mediante el uso de barreras físicas (loros metálicos) las cuales se disponen a lo largo de toda la ruta. Una vez completado esto, se procede a extraer la marina.



Figura 17: Extracción de marina con equipo LHD (Crane and Machinery)

### 3.1.11 Acuñadura Mecanizada

La acuñadura (Figura 18) se realiza para botar oportunamente las rocas sueltas o las cuales presenten potencial de caída presentes en la frente de avance producto de la tronadura, para evitar que caigan de improviso y provoquen accidentes. Se lleva a cabo mediante el uso de equipos mecanizados de acuñadura, los cuales cuentan con un brazo y un martillo que permiten realizar la acuñadura de toda la frente.



Figura 18: Acuñadura mecanizada (Induambiente)

### 3.1.12 Perforación Perno-Cable

Las galerías de los niveles de producción son reforzadas mediante el uso del método de fortificación de perno-cable, para así controlar el riesgo de caída de roca en la frente de trabajo. Para ello es necesario realizar una serie de perforaciones en dirección del avance de las labores de desarrollo, esta se realiza con el uso de un equipo de perforación Jumbo.

El equipo que realiza esta operación consiste en un operador Jumbo y su ayudante, los cuales proceden a coordinar las acciones del equipo y realizan la perforación de la malla predeterminada para la distribución de los pernos.

### 3.1.13 Anclaje Perno-Cable

La operación de anclaje de perno-cable hace referencia al relleno del espacio anular entre la barra y el pozo con un producto que posteriormente se solidifica (lechada). Para realizar esta operación se utiliza un equipo para inyectar la lechada, un mezclador (*mixer*) para la mezcla y una grúa con jaula dotada de techo protector, esto debido a que el personal no puede exponerse a una frente de avance sin fortificar.

La operación procede con acercar al personal y el equipo de lechada mediante la grúa a los distintos tiros realizados en la etapa de perforación en sentido del avance de la frente, así el personal rellena los tiros desde el ingreso de la galería hacia la pared del frente de avance y desde el techo hacía los tiros laterales

### 3.1.14 Instalación y Fraguado de Perno-Cable

La instalación de perno-cable consiste en la utilización de un equipo Jumbo, el cual coloca los pernos en sus respectivos tiros a través de la malla de perforación realizada. Luego, con la lechada ya instalada y el perno colocado, se procede a esperar alrededor de 120 minutos que la lechada fragüe y se solidifique.

### 3.1.15 Instalación de Malla y Planchuela-Tuerca

Esta operación consiste en la disposición e instalación de la malla a través de toda la galería a fortificar, la cual tiene como principal objetivo la captura y soporte de material o roca que se pueda desprender y causar algún tipo de accidente. Se realiza mediante el uso de un equipo mecanizado, el cual carga el rollo de malla y lo va estirando alrededor de la frente, luego se procede a fijar la malla con el uso de planchuelas y tuercas las cuales son instaladas sobre la malla, fijándolas en los pernos previamente instalados. En la Figura 19 se puede apreciar un ejemplo de un Jumbo instalador de perno y malla.



Figura 19: Equipo jumbo instalador de perno y malla (Rabajille, 2017)

### 3.1.16 Aplicación de Shotcrete

El hormigón proyectado o *shotcrete* (Figura 20) se utiliza como parte del sistema de fortificación de las galerías con la función de retener material particulado o rocas de menor tamaño compactadas para así evitar su desprendimiento. Este es transportado a través de una manguera y lanzado neumáticamente, con un equipo mecanizado (*Roboshot*) con compresor a alta velocidad, contra la cara de la galería. La alta presión a la cual es proyectado provoca que este se compacte y distribuya de manera uniforme sobre la cara de la galería.

La operación inicia con la verificación, por parte del operador, de que el área a proyectar se encuentre previamente lavada con agua y sin elementos que puedan interferir con la realización de la actividad o conexión a las redes.

A continuación, se procede a posicionar el equipo *Mixer* y el *Roboshot* en la zona de trabajo, para luego trasvasiar en el *Roboshot* el aditivo de aceleración junto con el *shotcrete*. Luego se comienza con la proyección del *shotcrete* sobre la galería de manera ascendente, hasta cubrir toda el área.



*Figura 20: Aplicación de shotcrete (Neotecnica SAC Ingeniería)*

### **3.1.17 Construcción de Cama de Mineral**

Se construye una cama de mineral fino con un equipo LHD, el cual utiliza su pala para emparejar el piso, brindando así las condiciones de trabajo para la operación de carguío de explosivos.

### **3.1.18 Limpieza de Pista**

Producto las irregularidades generadas en la calle por donde transitan los equipos, en específico las rutas de producción y marina, debido a material derramado e irregularidades en el piso lo cual daña en gran medida a los equipos, sobre todo a los neumáticos.

Se utiliza un equipo LHD el cual pasa su pala a ras de piso por la ruta a limpiar removiendo así todo el material que podría afectar a los equipos.

### **3.1.19 Hormigonado de Pista**

Una vez finalizada la fortificación de la galería, se procede a aplicar hormigón en el piso con el objetivo de emparejar la pista, conseguir las dimensiones del diseño de esta y proporcionar buenas condiciones de operación.

La operación se realiza mediante la utilización de una fresadora para hormigón aplicando distintos tipos de hormigón dependiendo de las características de los equipos que transiten por el lugar y las condiciones del terreno.

### **3.1.20 Carpeta de Rodado**

Adicional al hormigón, en áreas en donde transitan equipos pesados es necesario instalar una capa de hormigón (Figura 21) más resistente con el fin de aumentar la durabilidad de los caminos.

Se procede a colocar la carpeta respetando el diseño de la galería, empleando el hormigón en tramos aproximados de 3 metros alternados, se realizará la compactación de este hormigón con vibradores de inmersión, pasando el período de fragüe de unas 24 horas.

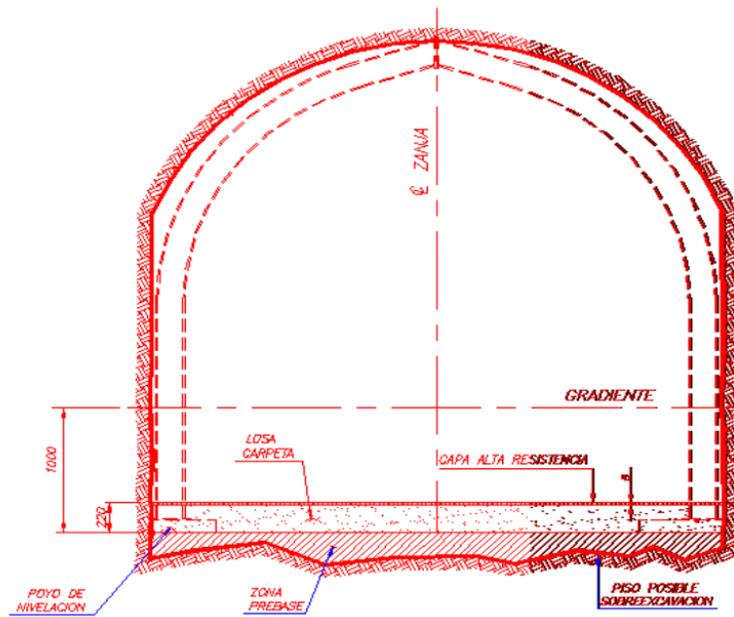


Figura 21: Instalación de carpeta de rodado (Camhi, 2012)

### 3.1.21 Instalación Marco en Visera

A causa de la importancia de los puntos de extracción en las minas de Block y Panel Caving y a los esfuerzos y condiciones a las que son expuestos, estos se refuerzan con marcos prefabricados para asegurar la estabilidad del punto.

Primero se procede a la instalación de los cables con los cuales se fortificará la zona. Esto se lleva a cabo mediante el uso de un equipo Jumbo de 1 brazo, equipado con una mordaza hidráulica, la cual sujeta las barras al momento de cambio de barras. Luego se utiliza un equipo manipulador telescópico equipado con una plataforma, además de una lechadora de accionamiento eléctrico, con lo que se procede a instalar los cables y a tensionarlos. Finalizado esto, se procede a hormigonar el punto instalando el marco.

### 3.1.22 Marcación de Pernos *Split-Set*

Luego de la acuñadura se procede a demarcar la ubicación de las perforaciones donde se instalarán los pernos de refuerzo tipo *Split-Set*. Esta labor se realiza de manera manual por el personal de obras civiles que marcan la malla de perforación en la galería, la cual va a variar dependiendo de la sección de esta.

### 3.1.23 Perforación de Pernos *Split-Set*

La perforación para la instalación de pernos se realiza en la dirección de avance del desarrollo, la cual se lleva a cabo con un equipo de perforación Jumbo.

La operación es realizada por un operador y un ayudante, se inicia por aislar la zona e instalar el equipo Jumbo en la frente de trabajo. Luego se procede a perforar la malla desde la parte superior hacia el suelo.

### **3.1.24 Instalación de Pernos *Split-Set***

Una vez terminada la perforación de la malla, se instala la copla porta *Split-Set*, y el ayudante procede a cargar los pernos al Jumbo para que luego sean insertados en cada tiro de manera mecanizada por el equipo.

### **3.1.25 Red Eléctrica**

Se realiza la instalación de una red eléctrica a través de las galerías de la mina por donde transitan los equipos de producción y preparación hasta las zonas de trabajo, ya que los equipos requieren de energía eléctrica para realizar las operaciones.

Se inicia realizando el suministro y montaje del mensajero para cables de media tensión, considerando la extensión de la galería en donde se instalará la red. Primero se perfora e instalan los pernos ojo, según planos de referencia y estándares de montaje para luego montar el cable de acero galvanizado.

Después se monta el carrete en patas porta carrete en un lugar nivelado colocando una manga en la punta del cable. Luego se extenderá el cable, mediante el uso de un equipo de levante, a través de los anillos porta conductor y se ira fijando en ellos a medida que se avanza. Finalizando el tendido del cable se procede a conectarlo a la estación de suministro de energía respectiva.

### **3.1.26 Red Hídrica**

La instalación de la red hídrica en la mina se realiza de manera equivalente a la instalación de la red eléctrica. Esta red se instala por la caja opuesta a la red eléctrica y en conjunto con la red neumática.

Se comienza por la conexión de las cañerías a la bomba de agua, para luego realizar el tendido a través de la galería acoplando las cañerías de manera manual a los soportes instalados. Una vez tendidas las cañerías, se procede a instalar los puntos de abastecimiento de agua en los lugares designados para su uso, los cuales se encuentran cercanos al frente de perforación y las zanjas en desarrollo.

### **3.1.27 Red Neumática**

Las operaciones de minería subterránea requieren de un suministro de aire comprimido a través de las distintas frentes para ser usado por todo tipo de operaciones, siendo utilizado como fuente de energía para equipos neumáticos o medio de transporte para líquidos y sólidos.

Se establece una planta compresora como fuente del aire comprimido, la cual debe ser ubicada en un sector resguardado. Una vez estimado el consumo de aire comprimido requerido por cada frente, se realiza el diseño de las instalaciones y la distribución necesaria de los tubos de transporte. Estos tubos son dispuestos de igual manera que la red eléctrica a través de las galerías hacia las frentes en donde son instaladas las conexiones pertinentes para que los equipos y maquinaria puedan conectarse a la red.

### **3.1.28 Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados**

La operación de equipos telecomandados y autónomos requiere de una robusta red inalámbrica de comunicaciones multiservicio, permitiendo la operación y gestión remota de ellos en tiempo real.

La red inalámbrica para los sistemas autónomos y teleoperados se compone principalmente de *access Points*, redes de datos y controladores de red, los cuales son instalados de manera previa a la operación. Los *access points* consisten en una serie de equipos de comunicación colocados en de la galería, los cuales permiten monitorear e interactuar con el equipo de forma inalámbrica. Estos *access points* son conectados a través de una red de fibra óptica la cual es instalada de igual manera que la red eléctrica de la mina. En en la sala de control de la operación se instala un controlador de red el cual permite que el roaming que se produce cuando un equipo móvil transita entre distintos *access points* sea más rápido.

### **3.1.29 Raise Borer Drilling**

Método de excavación a través de perforación y escariado, que requiere de un nivel inferior y superior. Se utiliza un sistema mecanizado denominado *Raisebore*, el cual lleva a cabo la excavación en dos etapas: una perforación piloto inicial; escareo ascendente posterior. El método es utilizado para excavaciones desde 0,7 a 8 metros y múltiples alturas.

Primero se procede a detallar la topografía y el marcado de la frente, para luego construir una losa de hormigón o un soporte de vigas de acero para el equipo. Una vez montado el equipo, este realiza una perforación piloto hasta el nivel inferior la cual servirá como guía para evitar desviaciones en la excavación. Posterior a esto, se monta el equipo de escariado para comenzar con la excavación ascendente, la marina cae por gravedad y luego es retirada con un equipo LHD.

Finalizada la excavación se retira el equipo y el montaje para realizar una acuñadura y fortificación posterior de la excavación.

### **3.1.30 Blind Hole Drilling**

Método de excavación a través de perforación y escariado, que requiere solo de un nivel inferior. Se utiliza un sistema mecanizado denominado *Blindhole* o *Blindbore*, el cual basa su proceso en la realización de una perforación piloto y posterior escariado.

Primero se procede a detallar la topografía y el marcado de la frente, para luego construir una losa de hormigón o un soporte de vigas de acero para el equipo. Luego se procede con una perforación piloto/escariado de forma simultánea, para evitar desvíos en la excavación, de manera ascendente hasta alcanzar la altura deseada para el desarrollo.

La marina cae por gravedad sobre el equipo, el cual cuenta con una tolva de recepción de marina para su adecuado manejo.

## **3.2 Operación Mina**

A continuación, se detallan las operaciones realizadas en la etapa de operación mina. Se definen todas las operaciones involucradas en los sub-procesos de socavación, producción, traspaso, transporte e infraestructura.

### **3.2.1 Perforación Radial para Socavación**

La tarea consiste en perforar dentro de las galerías de hundimiento de forma radial para cargar explosivos y posteriormente quemar e inducir el hundimiento en el macizo rocoso. Esta se lleva a cabo por paradas de avance, las cuales equidistan a lo largo del túnel.

Este proceso se lleva a cabo con el uso de un equipo de perforación radial Jumbo, el cual es operado por un operador y un ayudante.

### **3.2.2 Moneo**

Consiste en instalar rollizos y cuñas de madera noble para construir una estructura denominada coloquialmente como “Mono”. Este es utilizado para brindar estabilidad para trabajar en el frente de hundimiento ya que sostiene el frente ante eventuales deformaciones causadas por los esfuerzos generados en la roca por las excavaciones.

### **3.2.3 Carguío de Explosivos en Tiros Radiales**

De manera manual se procede a limpiar y medir los pozos para asegurar su dimensión y un buen resultado de la tronadura. Posteriormente, se procede a restringir el área para comenzar el carguío de explosivos de manera manual a través del uso de mangueras, de manera equivalente a la operación de carguío de explosivos de frente.

### **3.2.4 Tronadura de Tiros Radiales**

Se procede a la aislación completa del sector y de los alrededores mediante el uso de barreras físicas (ej: loros metálicos) y realizar una coordinación total de la zona para asegurar que no exista ninguna interferencia con otra operación o que afecte a personal presente en las cercanías. Una vez realizados los protocolos de seguridad y coordinación, se procede a realizar la tronadura, todo esto es coordinado a través del jefe de turno y el equipo de tronadura.

### **3.2.5 Carguío LHD**

El carguío LHD consiste en la carga del mineral procedente del hundimiento que reside en el punto de extracción mediante el uso de un equipo LHD para su posterior transporte. La operación inicia una vez el equipo es posicionado frente al punto de extracción, luego se procede al reconocimiento de cual zona es preferente al carguío dependiendo del tamaño y la distribución del mineral, una vez realizado esto el equipo ingresa al punto de extracción y comienza el carguío hasta llenar la pala.

### **3.2.6 Transporte LHD**

Esta operación se realiza luego de la etapa de carguío LHD, la cual consiste en el transporte del mineral cargado desde el punto de extracción hacia los piques de traspaso o al chancador, dependiendo del diseño de la mina.

Primero se realiza una evaluación del área de trabajo para proceder con la extracción y transporte del mineral. La ruta por la cual transitara el equipo debe estar delimitada y confinada totalmente con barreras físicas. Una vez realizado esto, se realiza un chequeo de los puntos de extracción y el estado de los piques de vaciado o chancador para finalmente comenzar con la operación.

### **3.2.7 Descarga LHD**

La descarga LHD es la última operación que realiza el equipo LHD en su ciclo de trabajo. Esta operación se lleva a cabo cuando el equipo alcanza su destino de descarga, pique de traspaso o chancador. Primero se procede a acular el equipo para que este quede posicionado correctamente con el punto de descarga, luego se avanza hasta la zona de descarga, una vez posicionado el equipo procede a acercar la pala al punto de descarga para luego soltar el mineral en el punto. Completada esta operación el equipo procede a retirarse de la zona de descarga y continuar con el ciclo de trabajo.

### **3.2.8 Reducción Martillo Móvil**

En ocasiones luego de la tronadura o del fracturamiento de la roca, se generan colpas de mineral de gran tamaño las cuales exceden el tamaño mínimo necesario para pasar por los piques de traspaso. La reducción de estas colpas puede ser realizada a través del uso de un martillo móvil, el cual consiste en un equipo diésel con cabina el cual cuenta con una cuña para llevar a cabo la reducción.

### **3.2.9 Reducción Martillo Fijo (producción, traspaso y transporte)**

El martillo fijo es un equipo el cual cuenta con un brazo y una cuña los cuales se utilizan para la reducción de colpas de gran tamaño que no pasan por la parrilla de los piques. Es instalado en un costado de los piques de traspaso y se opera de manera telecomandada.

Por lo general se opta por estos equipos si la cantidad de material que pasa por los piques de traspaso es significativa y constante.

### **3.2.10 Limpieza de Cámaras**

Producto de la caída desde altura del mineral parte de este cae al piso de la cámara por lo que se hace necesario trasladarlo a la zona de la parrilla. La tarea se realiza en forma mecanizada con equipos de apoyo.

### **3.2.11 Transporte por Ferrocarril**

Para realizar la extracción del mineral al exterior de la mina es posible utilizar un sistema de ferrocarriles de carga. Este se basa en la instalación de vías en el nivel de transporte que permitan al ferrocarril posicionarse bajo buzones de descarga para lograr el carguío del mineral.

Este sistema de transporte tiene la ventaja de representar un bajo coste operacional y que permite el transporte de grandes cantidades de mineral. En cuanto a sus desventajas esta la gran inversión capital necesaria para la instalación de infraestructura y la baja flexibilidad que presenta este sistema.

### **3.2.12 Transporte por Correas**

Otro sistema de extracción de mineral al exterior de la mina es mediante el uso de correas transportadoras (Figura 22). El sistema de correas transportadoras está conformado por un armazón, un conjunto de poleas, polines y el equipo generador o motor que moviliza la correa.

Las correas transportadoras son cargadas con mineral de baja granulometría procedente del chancador a través de un chute, aquí el mineral cae sobre la correa y es transportado al exterior

mina. El uso de correas permite una extracción del mineral de manera continua y automatizada, pero no transporta una gran cantidad de mineral como los otros sistemas y el mantenimiento del equipo es vital para la operación, siendo este un sistema poco flexible con respecto a fallas.



Figura 22: Transporte por correas (Minería Chilena)

### 3.2.13 Transporte con Camiones de extracción CAEX

Sistema de extracción de mineral basado en el uso de camiones mineros de bajo tonelaje. Estos equipos se encuentran ubicados en un nivel de transporte el cual su diseño va acorde con los puntos de vaciado del nivel de producción, generando rutas denominadas *loops* a través de los cuales los camiones se movilizan. En cada punto de vaciado se localiza un buzón en donde se acumula el mineral proveniente del nivel de producción, una vez lleno el camión se localiza bajo este y se vacía el buzón, para luego transportar el mineral a su punto de destino.

El uso de este sistema de transporte de mineral, al igual que los anteriores, depende completamente del diseño de la mina y los factores económicos presentes para el proyecto.

### 3.2.14 Instalación Sistema de Confinamiento

Para poder operar con los niveles de seguridad necesaria en una operación autónoma o telecomandada, refiriéndose específicamente al control de accesos del personal al área donde operan los equipos automatizados, se necesita implementar un sistema de confinamiento con puertas y/o barreras duras que aisle la zona durante la operación del equipo (Vargas, 2013). Este sistema de confinamiento se basa principalmente en la utilización de puertas de acceso al nivel, sensores y barreras de confinamiento, las cuales están conectadas entre sí a través de la red de comunicaciones existente para el sistema.

Los puntos de acceso se definen como una zona intermedia entre la zona manual y autónoma, está conformada por dos puertas motorizadas controladas y monitoreadas por sensores comunicados al sistema de control, lo cual permite mantener el aislamiento de la zona autónoma.

Las barreras de confinamiento, compuestas por portones móviles, tienen como fin evitar el acceso de personas o equipos manuales a cualquier área de la operación autónoma, durante el periodo de operación. Este tipo de barreras permite aislar diferentes zonas de la operación de manera individual, como por ejemplo calles, zanjas o semi-zanjas, dándole una mayor flexibilidad a la operación.

Estas instalaciones son instaladas a medida que avanza la operación autónoma, en caso de la preparación minera, o de manera definida para la producción. Las redes y sensores son instaladas en conjunto con la red del sistema de operación autónoma y las barreras duras por personal de obras civiles.

### **3.3 Operaciones Auxiliares**

A continuación, se detallan todas las operaciones auxiliares que se realizan en la operación.

#### **3.3.1 Acuñadura Mecanizada**

Operación equivalente a la acuñadura realizada en la etapa de preparación minera, solo que se realiza en galerías o zonas ya desarrolladas las cuales requieran de algún reajuste debido a que hayan sufrido algún tipo de daño a causa de los esfuerzos o de tronaduras cercanas las cuales causaran el desprendimiento de la roca y que requiera ser acuñada previo a su reparación.

#### **3.3.2 Reducción Secundaria con Martillo Móvil**

Existen casos en donde colpas con sobre tamaño que no pueden ser llevadas al pique de traspaso y que resultado de la operación terminan en áreas que entorpecen a los equipos presentan un tamaño tal que la utilización de explosivos no es necesaria para su reducción y esta se realiza de manera manual mediante el uso de un martillo móvil.

#### **3.3.3 Perforación para Tronadura Secundaria**

Perforación que se hace necesaria frente la ocurrencia de colgaduras en los puntos de extracción o caída de colpas que no pueden ser cargadas por el equipo LHD.

Mediante el uso de un equipo de perforación Jumbo se perfora la roca en puntos específicos para que la tronadura sea eficiente.

#### **3.3.4 Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria**

Posterior a la perforación, se introduce un elemento explosivo en el pozo perforado, por lo general en caso de colgaduras, es imposible perforar por motivos de seguridad por lo que se procede a introducir de manera manual un coligue al que se amarra un explosivo.

#### **3.3.5 Tronadura Secundaria**

Una vez instalado el explosivo respectivo en la colpa, se procede a aislar la zona estableciendo un perímetro de seguridad para luego realizar la tronadura. Esto lo realiza la cuadrilla de tronadura respectiva

#### **3.3.6 Limpieza de Pista**

Consiste en la misma operación que se describe en la sección de desarrollo y preparación minera. Se considera de carácter auxiliar debido a que se lleva a cabo en circunstancias que no son causadas especialmente por la caída de material a causa del transporte de marina.

### **3.3.7 Reparación de Pista**

En ocasiones el camino sufre desgastes de distinta envergadura por lo que se hace necesario repararlo. Las reparaciones pueden ser de carácter simple, en donde solo se deba rellenar el desperfecto o bien mayores en los cuales sea necesario picar el camino para reinstalar la configuración de hormigón y la carpeta de rodado dependiendo de la zona. Esta labor la lleva a cabo las cuadrillas pertenecientes a la división de obras civiles.

### **3.3.8 Mantenimiento de Infraestructuras**

Frecuentemente las infraestructuras presentes en la mina (muros de confinamiento, revestimiento de curvas, mallas, etc.) sufren una serie de daños a causa de colisiones de los equipos, esfuerzos generados por el macizo, tronaduras cercanas o eventos de sismicidad. Debido a ello, en caso de que se generen daños es necesario llevar a cabo las mantenciones respectivas para asegurar la vida útil de la estructura y la seguridad de la operación. Esta labor la realiza la cuadrilla perteneciente a la división de obras civiles.

### **3.3.9 Mantenimiento de Redes**

La mantención de redes se lleva a cabo, en promedio, cada dos meses dependiendo del tipo de faena o en caso de que ocurra un imprevisto (Salvador, 2018). Esta se realiza de manera manual por personal clasificado para la tarea y previamente autorizado.

Se procede cortando el suministro de la red a trabajar, una vez realizado esto se aísla la zona y el personal procede a realizar las mantenciones correspondientes. Finalizada la mantención se chequea el correcto funcionamiento de la red, para luego habilitar la zona previamente aislada y continuar con el funcionamiento normal de la mina.

### **3.3.10 Mantenimiento de Buzones**

El mantenimiento de los buzones se realiza de manera manual, por personal clasificado para la tarea. Esta actividad se basa en mantenciones planificadas y no planificadas del tipo mecánico, eléctrico, neumático y estructural. Se consideran las siguientes actividades:

- Cambio de tolvas
- Cambio de paneles
- Cambio de cilindros
- Mantención de planchas interiores
- Mantención de vigas
- Reparaciones estructurales
- Reparaciones mecánicas de válvulas
- Mantención de patos lubricadores
- Mantención de plataformas de trabajo
- Reparaciones de piping
- Mantención de luminaria del equipo
- Mantención de consolas de operación
- Mantención de razadores y acomodadores de colpa
- Mantención de red de aire y agua del equipo

### 3.3.11 Mantenimiento de Equipos

Esta operación consiste en la mantención de los equipos mineros móviles utilizados en la operación (ej: Jumbo, Mixer, LHD, etc.). Se realiza en el taller mecánico designado en la operación, el cual según diseño de la faena, está ubicado en puntos estratégicos fuera de la zona de operación pero relativamente cerca y accesible para los equipos. Debido a la intensidad el uso de los equipos y el tipo de trabajo que realizan la mantención de los equipos se divide en dos categorías:

- **Mantención preventiva:** Mantención planificada basada en las recomendaciones del fabricante y ajustada en base a los rendimientos reales de los equipos en la operación.
- **Mantención correctiva:** Mantención que se realiza cuando se alcanzan las horas estimadas como límites de vida del equipo o cuando se produce alguna avería.

Para realizar la mantención, primero se detiene el equipo de cualquier actividad que esté realizando para que luego el personal a cargo lo lleve al taller mecánico respectivo. Una vez en el taller, se reporta la falla que presenta el equipo o el tipo de mantenimiento que requiere y los mecánicos realizan la mantención. Terminada la mantención el equipo mecánico finaliza el reporte y entrega el equipo al personal responsable para que lo retire del taller y continúe su operación.

### 3.3.12 Mantenimiento de Martillos

El mantenimiento de los martillos picadores se divide en las mismas dos categorías que el mantenimiento de los equipos, mantenimiento preventivo y correctivo. La mantención de estos equipos se lleva a cabo en la misma zona de trabajo debido a que el equipo no puede ser desinstalado del punto de vaciado en el que se encuentra. Para ello el equipo de mecánicos aísla la zona y se inutiliza el punto de vaciado durante la mantención. Una vez terminada la mantención respectiva, se habilita de nuevo la zona de trabajo y se retira el equipo de mantenimiento.

### 3.3.13 Insumos

Las distintas operaciones realizadas en la operación requieren distintos insumos dependiendo del tipo de operación. Estos insumos deben ser suministrados de manera eficaz y segura a través de la mina, para lograr minimizar los tiempos de espera y maximizar la seguridad de la operación.

- **Diésel:** el suministro de diésel a los equipos se realiza en lugares de abastecimiento y distribución predeterminados por diseño. El diésel lo transporta un vehículo diseñado para ello, el cual cuenta con un tanque de transporte certificado y un sistema de abastecimiento incluido. El equipo a ser suministrado se transporta a la zona determinada para el petróleo, una vez instalado comienza el trasvasije del diésel desde el vehículo transportador al equipo, completada la operación se corta el suministro y se desacoplan los equipos.
- **Aceros de perforación:** los equipos de perforación son suministrados de aceros de perforación en las zonas predeterminadas como talleres. Aquí son suministrados de manera manual por los operadores, los cuales cargan el equipo.
- **Explosivos:** los explosivos utilizados para las tronaduras en faena solo pueden ser manipulados por personal certificado para ello. Los explosivos son guardados en zonas denominadas “polvorines” ubicados al interior mina. Estos son transportados en vehículos certificados para el transporte de explosivos por el personal encargado desde los polvorines a la frente de trabajo para su uso.

- Malla y pernos de fortificación: los equipos de instalación de pernos y malla para la fortificación de galerías son abastecidos en el mismo lugar en donde se está llevando a cabo la perforación. Los pernos y malla son resguardados en una zona determinada dentro del confinamiento para evitar que el equipo se tenga que retirar de la zona en búsqueda de más insumos.

## 4. Análisis de Desarrollo e Implementación de Tecnología Autónoma

A partir del desglose realizado en la sección anterior, se realiza una estimación de la cantidad de tiempo necesario para lograr la automatización de cada una de las operaciones.

Primero se investiga el estado actual en el cual se encuentra cada una de las operaciones clasificando su estado de automatización en las categorías: Manual, Telecomandada y Autónoma. Luego se procede a estimar la cantidad de años necesarios para lograr que la operación sea telecomandada y autónoma, suponiendo que se realiza un proyecto de desarrollo de la tecnología y su posterior implementación en la industria. Esta estimación se realizó con la colaboración del personal del Laboratorio de robótica de campo, del grupo de Automatización en Minería del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC).

Para realizar la estimación se toman en cuenta una serie de supuestos los cuales son necesarios para establecer un escenario realista para el desarrollo de la tecnología. Estos son definidos a continuación:

- Supuestos Operacionales: Estos supuestos consideran los protocolos de operación y seguridad, junto con las modificaciones a la infraestructura de la mina necesarios para que un equipo telecomandado o autónomo opere dentro de ella.
  1. Se define como zona de operación autónoma, al área de trabajo aislada y delimitada por barreras físicas para el trabajo único de los equipos telecomandados y autónomos. Esta se encuentra dentro de la zona de producción o frentes en desarrollo y su acceso está determinado por una zona de registro que permite el acceso a ella.
  2. Los equipos telecomandados y autónomos solo pueden operar dentro de la zona de operación autónoma.
  3. Los equipos telecomandados son comandados en salas de operación remotas a la faena.
  4. La mantención de los equipos telecomandados y autónomos móviles son realizadas de manera manual en una zona exterior a la zona de operación autónoma.
  5. La mantención de los equipos telecomandados y autónomos fijos es realizada dentro de la zona de operación autónoma por el personal de mantenimiento. La zona debe detener su operación previo al ingreso del personal.
  6. Los equipos telecomandados y autónomos son reabastecidos de cualquier tipo de insumo que requieran de manera manual en una zona exterior a la zona de operación autónoma. (ej: Aceros de perforación, diésel, mallas, pernos, explosivos, etc.)
  7. Los equipos telecomandados y autónomos consideran una conexión a las redes hídricas y eléctricas de la mina de manera autónoma durante su operación.
- Supuestos de Proyecto: Se considera una serie de supuestos para lo que se refiere al proyecto de desarrollo de la nueva tecnología requerida para cada operación. Se toma en

consideración las condiciones de la industria, la estabilidad del trabajo para el desarrollo del proyecto y contratiempos.

1. Se considera que la duración de la licitación del proyecto para el desarrollo de la nueva tecnología tendrá una duración de 6 meses.
2. El periodo de adjudicación de pruebas de validación industrial tendrá una duración de 6 meses.
3. El periodo de empaquetamiento y transferencia de la tecnología para proceder con su desarrollo industrial tendrá una duración de 1 año.
4. Se considera que los proyectos de desarrollo contarán con disponibilidad para realizar pruebas de carácter industrial en faena.
5. Se considera que la industria colaborará con el desarrollo del proyecto.
6. Se considera que es posible el desarrollo en paralelo de estas tecnologías, sin que influya el número de tecnologías a desarrollar dentro de una misma operación en ámbitos de realización de pruebas y de presupuesto para los proyectos.

Con los supuestos ya definidos se procede a analizar en detalle cada operación evaluando los siguientes criterios:

- Estado actual de automatización de la operación.
- Condiciones de la zona de trabajo en donde opera el equipo.
- Tipo de operación que realiza el equipo.
- Número de personal requerido por operación.
- Nivel de interacción que tiene el equipo con el personal, otros equipos y el ambiente de la mina.
- Insumos utilizados en la operación.
- Requerimiento de conexión a redes (hidráulica, eléctrica o neumática).

Tomando en cuenta estos criterios, se procede a realizar la estimación de la cantidad de años necesarios para telecomandar y automatizar cada una de las operaciones. Se establece una serie de rangos para caracterizar la estimación siendo estos de 0 a 4 años, 4 a 6 años y mayor a 6 años.

Para realizar un análisis de las posibles operaciones a telecomandar o automatizar a futuro, se establece como supuesto que si la cantidad de años para telecomandar la operación está dentro del mismo rango de tiempo (0-4,4-6 o >6) que la cantidad de años necesarias para automatizar se optará por la opción de automatizarla, ya que automatizar la operación presenta un mayor beneficio para la operación.

En la Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5 se muestran los resultados de la estimación indicando el rango de años necesarios para desarrollar cada tecnología, los años en detalle necesarios para cada operación pueden ser vistos en Anexo A.1:

Tabla 3: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Operación.

Proceso	Operación	Estado de Automatización	Telecomandada [años]	Automatización [años]
Operación Mina	Perforación Radial para Socavación	Manual	4-6	4-6
	Moneo	Manual	>6	>6
	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Manual	4-6	4-6
	Tronadura de Tiros Radiales	Manual	0-4	0-4
	Carguío LHD	Telecomandada	0	4-6
	Transporte LHD	Autónoma	0	0
	Descarga LHD	Autónoma	0	0
	Reducción Martillo Móvil	Manual	0-4	4-6
	Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0	4-6
	Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0	4-6
	Limpieza de Cámaras	Telecomandada	0	0-4
	Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0	4-6
	Transporte por Ferrocarril	Autónoma	0	0
	Transporte por Correas	Autónoma	0	0
	Transporte CAEX	Autónoma	0	0
Instalación Sistema de Confinamiento	Manual	>6	>6	

Tabla 4: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Actividades Auxiliares.

Proceso	Operación	Estado de Automatización	Telecomandada [años]	Automatización [años]
Actividades Auxiliares	Acuñadura Mecanizada	Manual	0-4	4-6
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	Manual	4-6	4-6
	Perforación para Tronadura Secundaria	Manual	0-4	4-6
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	Manual	0-4	4-6
	Tronadura Secundaria	Manual	0-4	0-4
	Limpieza Pista	Telecomandada	0	4-6
	Reparación de Pista	Manual	0-4	4-6
	Infraestructuras	Manual	>6	>6
	Redes	Manual	>6	>6
	Buzones	Manual	>6	>6
	Martillos	Manual	>6	>6
	Equipos	Manual	>6	>6
	Insumos	Manual	>6	>6

Tabla 5: Rango de años necesarios para automatizar las operaciones del proceso de Preparación Minera.

Proceso	Operación	Estado de Automatización	Telecomandada [años]	Automatización [años]
Preparación Minera	Marcado de Frente	Manual	0-4	0-4
	Perforación de Avance Horizontal	Manual	0-4	4-6
	Limpieza de Zapatera de Frente	Manual	4-6	4-6
	Carguío de Explosivos	Manual	4-6	4-6
	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	Manual	0-4	4-6
	Ventilación	Autónoma	0	0
	Chequeo de Frente (gases)	Manual	0-4	0-4
	Fotogrametría en 3D	Manual	0-4	4-6
	Regado de Frente	Manual	0-4	4-6
	Extracción de Marina	Telecomandada	0	4-6
	Acuñadura Mecanizada	Manual	0-4	4-6
	Perforación Perno-Cable	Manual	0-4	4-6
	Anclaje Perno-Cable	Manual	0-4	4-6
	Instalación y Fraguado de Perno-Cable	Manual	0-4	4-6
	Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	Manual	4-6	4-6
	Aplicación de Shotcrete	Manual	0-4	4-6
	Construcción de Cama de Mineral	Manual	0-4	4-6

Limpieza de Pista	Telecomandada	0	4-6
Hormigonado de Pista	Manual	4-6	4-6
Carpeta de Rodado	Manual	4-6	4-6
Instalación Marco en Visera	Manual	>6	>6
Marcación de Pernos Split-Set	Manual	0-4	4-6
Perforación de Pernos Split-Set	Manual	0-4	4-6
Instalación de Pernos Split-Set	Manual	0-4	4-6
Red Hidráulica	Manual	>6	>6
Red Eléctrica	Manual	>6	>6
Red Neumática	Manual	>6	>6
Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	Manual	>6	>6
Raise Borer Drilling	Manual	>6	>6
Blind Hole Drilling	Manual	4-6	>6

En la Tabla 6 se muestra un resumen del análisis de estado actual de automatización de las operaciones:

*Tabla 6: Resumen de estado actual de automatización de las operaciones.*

Proceso	Manual	Telecomandada	Autónoma	Total
Operación Mina	6	6	4	16
Preparación Minera	27	2	1	30
Actividades Auxiliares	11	1	0	12
Total	44	9	5	58

Se puede apreciar que actualmente la mayoría de las operaciones se encuentra en estado manual, aproximadamente el 76%, mientras que las operaciones telecomandadas y autónomas representan solo el 16% y 8% respectivamente. Del total de operaciones telecomandadas y autónomas la mayoría de ellas pertenece al proceso de operación de la mina. Esto se debe principalmente a que

es más asequible telecomandar y automatizar las operaciones relacionadas con este proceso debido a que:

- Los equipos solo realizan una operación en específico, no realizan multitareas en la mina.
- Al estar relacionadas directamente con la producción son más tentadoras para la industria a desarrollar esa tecnología.
- No interactúan de manera continua con otras operaciones en su ciclo de trabajo.
- Trabajan en zonas de trabajo fijas y estables que no sufren mayores cambios durante su desarrollo.

Todos estos factores hacen que se facilite el desarrollo y la implementación de este tipo de tecnologías. En cambio, las operaciones de los procesos de preparación minera y actividades auxiliares presentan una mayor dificultad para telecomandar y automatizar principalmente debido a que:

- Se realizan con equipos que tienen un multipropósito en la operación.
- Se requiere del trabajo intensivo de personal humano para complementar los trabajos del equipo, sobre todo en las operaciones que involucran obras civiles.
- Requieren la utilización de una serie de insumos y conexión a redes para realizar la operación.
- Dentro de los ciclos de preparación y desarrollo, las operaciones interactúan constantemente entre si lo cual dificulta el aislamiento continuo para la operación de equipos telecomandados y autónomos.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para un período de 0 a 4 años, como se puede ver una gran cantidad de operaciones presenta la oportunidad de ser telecomandada o automatizada. Durante este periodo de tiempo es posible telecomandar un 43% de ellas y de automatizar un 17%, lo cual significa una reducción considerable del número de operaciones en estado manual las cuales pasarían de representar un 76% a un 40%. El significativo aumento de la posibilidad de telecomandar las operaciones se debe a que este tipo de actividades presentan una mayor interoperabilidad y requiere de un menor desarrollo tecnológico que el necesario para automatizar la operación, lo cual permite desarrollar e implementar este tipo de tecnología en una menor cantidad de tiempo.

*Tabla 7: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de 0-4 años.*

<b>Proceso</b>	<b>Manual</b>	<b>Telecomandada</b>	<b>Autónoma</b>	<b>Total</b>
Operación Mina	5	5	6	16
Preparación Minera	12	15	3	30
Actividades Auxiliares	6	5	1	12
<b>Total</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>10</b>	<b>58</b>

Luego analizando la Tabla 8 la cual muestra el periodo de tiempo de 4 a 6 años, se aprecia que le número de operaciones con posibilidad de ser automatizadas aumenta significativamente. Se puede apreciar que del total de operaciones, un 52% presenta la oportunidad de ser automatizada y un 21% de ser telecomandada. Esto se traduce a que dentro de este periodo de tiempo es posible reducir el número de operaciones manuales a solo el 27% del total de operaciones.

*Tabla 8: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de 4-6 años.*

<b>Proceso</b>	<b>Manual</b>	<b>Telecomandada</b>	<b>Autónoma</b>	<b>Total</b>
Operación Mina	5	5	6	16
Preparación Minera	6	5	19	30
Actividades Auxiliares	5	2	5	12
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>12</b>	<b>30</b>	<b>58</b>

Por último, analizando la Tabla 9 que muestra el período de tiempo >6 años, se puede apreciar que para ninguna de las operaciones restantes es posible desarrollar e implementar su tecnología en faena en un tiempo menor a 6 años.

*Tabla 9: Resumen de estado de automatización de las operaciones en rango de >6 años.*

<b>Proceso</b>	<b>Manual</b>	<b>Telecomandada</b>	<b>Autónoma</b>	<b>Total</b>
Operación Mina	0	0	16	16
Preparación Minera	0	0	30	30
Actividades Auxiliares	0	0	12	12
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>58</b>	<b>58</b>

## 5. Análisis de Seguridad

Una de las principales motivaciones para automatizar las operaciones en minería subterránea es incrementar la seguridad, por lo que se toma como uno de los factores a evaluar en base a la posterior selección de operaciones tentativas a desarrollar la tecnología, siendo las operaciones que presentan un mayor riesgo las más llamativas para automatizar. En base a antecedentes operacionales de la mina El Teniente (Camhi, 2012; Vergara, 2015; Ccatamayo, 2017; Rabajille, 2017) se estima el número de personal promedio que requiere cada operación, junto con la cantidad de horas hombre trabajadas (HH) por mes que implica cada una. Esto permite analizar que operaciones presentan una mayor intensidad en el uso de personal, lo cual se relaciona directamente con el nivel de exposición al riesgo que presenta cada una. En la Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12 se pueden ver los resultados obtenidos.

Tabla 10: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Operación.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Nº de Personal	HH/Mes
Operación Mina	Socavación	Perforación Radial para Socavación	2	93
		Moneo	4	240
		Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	3	64
		Tronadura de Tiros Radiales	2	16
	Producción	Carguío LHD	1	612
		Transporte LHD	1	612
		Descarga LHD	1	612
		Reducción Martillo Móvil	1	30
		Reducción Martillo Fijo	1	23
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo	1	23
		Limpieza de Cámaras	1	30
	Transporte	Reducción Martillo Fijo	1	23
		Transporte por Ferrocarril	1	612
		Transporte por Correas	1	720
		Transporte CAEX	1	612
	Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	6	192

Tabla 11: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Preparación Minera.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Nº de Personal	HH/Mes
Preparación Minera	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	2	60
		Perforación de Avance Horizontal	2	350
		Limpieza de Zapatera de Frente	2	60
		Carguío de Explosivos	4	320
		Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	2	60
		Ventilación	0	0
		Chequeo de Frente (gases)	1	15
		Fotogrametría en 3D	2	30
		Regado de Frente	1	20
		Extracción de Marina	1	140
		Acuñadura Mecanizada	2	60
		Perforación Perno-Cable	2	160
		Anclaje Perno-Cable	3	180
		Instalación y Fraguado de Perno-Cable	3	180
		Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	3	150
		Aplicación de Shotcrete	2	60
		Construcción de Cama de Mineral	2	60
		Limpieza de Pista	1	30
		Hormigonado de Pista	4	1872
		Carpeta de Rodado	4	2880
		Instalación Marco en Visera	4	432
		Marcación de Pernos Split-Set	1	15
		Perforación de Pernos Split-Set	2	30
		Instalación de Pernos Split-Set	2	20
	Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	6	90
		Red Eléctrica	6	90
		Red Neumática	6	90
		Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	6	90
	Desarrollos Verticales	Raise Borer Drilling	2	200
		Blind Hole Drilling	2	200

Tabla 12: Personal y HH involucradas por operación en proceso de Actividades Auxiliares.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Nº de Personal	HH/Mes
Actividades Auxiliares	Apoyo	Acuñadura Mecanizada	1	3
		Reducción Secundaria con Martillo Móvil	1	3
		Perforación para Tronadura Secundaria	2	35
		Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	2	6
		Tronadura Secundaria	2	6
		Limpieza Pista	1	3
		Reparación de Pista	2	6
	Mantenimiento	Infraestructuras	2	720
		Redes	2	720
		Buzones	2	360
		Equipos	2	1440
		Martillos	2	360
	Abastecimiento	Insumos	2	90

Para poder cuantificar el nivel de riesgo que presenta cada operación se ha desarrollado un “Índice de Riesgo”, basado en distintos criterios de seguridad operacional y características de cada operación.

Primero se establece una categorización del nivel de riesgo humano que presenta cada operación según el grado de exposición del personal a situaciones o condiciones de riesgo al realizar la actividad. Se caracterizan cinco niveles de riesgo humano, siendo las operaciones más riesgosas las que el personal se encuentra presente en faena e involucrado directamente con las operaciones llevadas a cabo en la frente de desarrollo o producción (ej: Operadores de equipos, personal de carguío de explosivos), pasando luego a las operaciones que no están directamente relacionadas con el desarrollo o producción pero que se encuentran dentro de la faena (ej: Mantenición de equipos y redes, reabastecimiento de insumos) y por último las actividades que involucran la operación o supervisión pero que son realizadas de manera remota, siendo estas las que presentan un menor grado de exposición (ej: Operador de LHD telecomandado).

En la Tabla 13 se muestra la clasificación en detalle del nivel de riesgo humano y el criterio asociado a cada nivel:

Tabla 13: Categorización de Nivel de Riesgo Humano

<b>Nivel de Riesgo Humano</b>	<b>Exposición</b>	<b>Criterio</b>
<b>R1</b>	Interior riesgo alto	Personal al interior mina, dentro de la zona de producción o frente en desarrollo, y relacionado directamente con la operación.
<b>R2</b>	Interior riesgo medio	Personal al interior mina, dentro de la zona de producción o frente en desarrollo, pero no relacionada directamente con las operaciones de producción o desarrollo.
<b>R3</b>	Interior riesgo bajo	Personal al interior mina, pero fuera de la zona de producción o frente en desarrollo.
<b>R4</b>	Exterior teleoperado	Personal al exterior mina realizando operación telecomandada
<b>R5</b>	Exterior supervisión	Personal al exterior mina supervisando operación telecomandada o autónoma

A continuación, en la Tabla 14 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la clasificación de las operaciones según su nivel de riesgo. La clasificación en detalle se puede ver en el ANEXO A.2.

Tabla 14: Número de operaciones por nivel de riesgo humano.

<b>Nivel de Riesgo Humano</b>	<b>Número de Operaciones</b>	<b>Ejemplo</b>
<b>R1</b>	23	Perforación de Avance Horizontal
<b>R2</b>	21	Instalación de Carpeta de Rodado
<b>R3</b>	1	Chequeo de Gases
<b>R4</b>	8	Extracción de Marina (Telecomandada)
<b>R5</b>	5	Transporte por Correas

Los resultados indican que la mayoría de las operaciones presenta un nivel de riesgo alto, de las cuales un 40% presenta un nivel de riesgo R1 y un 36% un nivel de riesgo R2. Mientras que un 2% presenta un nivel de riesgo R3, un 14% como R4 y un 8% se clasifica como R5, lo que concuerda con lo indicado previamente que la mayoría de las operaciones se encuentran en estado manual actualmente y presentan un alto grado de riesgo.

Luego se procede a desarrollar una serie de criterios en base a los antecedentes de seguridad mostrados en la sección 2.5. En la Tabla 15 se puede apreciar la cantidad de eventos fatales relacionados con cada tipo de accidentes:

*Tabla 15: Número y porcentaje de fatales por tipo de accidente.*

<b>Accidentes Fatales</b>	<b>Número de Eventos Fatales</b>	<b>Porcentaje de Eventos Fatales%</b>
Golpeado por roca	30	32.9%
Equipos	8	8.7%
Transporte	14	15.3%
Caída de altura	14	15.3%
Apretado por	8	8.7%
Tronadura	3	3.3%
Ingestión	2	2.2%
Caída de mismo nivel	1	1.1%
Electrocución	2	2.2%
Explosión	2	2.2%
Golpeado por	6	6.5%
Temperatura	1	1.1%
Total	91	100%

Se puede ver que la mayoría de los accidentes están relacionados con la presencia del personal en faena y de la interacción del personal con equipos de gran envergadura o de gran energía. En base a esto y junto con el nivel de riesgo humano, previamente definido, se establecen los siguientes criterios bajo los cuales se evaluarán las operaciones con el fin de cuantificar su nivel de riesgo:

- C1: Nivel de riesgo humano que presenta la operación.
- C2: El personal se encuentra dentro de una cabina durante la operación.
- C3: El personal se encuentra dentro de la zona de transición durante la operación.
- C4: El personal se encuentra expuesto a ruido/polvo/vibraciones/gases durante la operación.
- C5: Nivel de ergonomía que presenta la zona de trabajo.
- C6: La operación requiere que el personal interactúe con equipos mineros de gran envergadura o energía.

A cada uno de estos criterios se le asigna un puntaje en caso de que se cumplan o no dentro de una operación. La distribución de puntajes para cada criterio es mostrada a continuación en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18:

Tabla 16: Puntaje asociado a criterios C1 y C2 de Índice de Riesgo.

<b>Nivel de Riesgo Humano</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Puntaje</b>
R1	8
R2	6
R3	4
R4	2
R5	0

<b>Personal dentro de cabina</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Puntaje</b>
SI	0
NO	0.5

Tabla 17: Puntaje asociado a criterios C3 y C4 de Índice de Riesgo.

<b>Personal dentro de zona de transición</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Puntaje</b>
SI	0.5
NO	0

<b>Personal expuesto a ruido/polvo/vibraciones/gases</b>	
<b>Criterio</b>	<b>Puntaje</b>
ALTO (>2hr)	0.5
MEDIO (2-1hr)	0.25
BAJO (< 1hr)	0

Tabla 18: Puntaje asociado a criterios C5 y C6 de Índice de Riesgo.

Nivel de ergonomía		Interacción con equipos mineros	
Criterio	Puntaje	Criterio	Puntaje
ALTO	0	ALTO	0.5
MEDIO	0.25	MEDIO	0.25
BAJO	0.5	BAJO	0

El índice de riesgo se desarrolla a partir de la suma de los puntajes asignados a cada criterio (Ecuación 3). A partir de los puntajes obtenidos para cada operación, se establece un rango del riesgo que representa cada uno a según la siguiente clasificación mostrada en la Tabla 19.

Tabla 19: Clasificación del nivel de riesgo operacional.

Riesgo	Puntaje Índice de Riesgo
Bajo	0-4
Medio	4-6
Alto	6-10

En la Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos para cada operación, el resultado en detalle se puede apreciar en el Anexo Análisis de Seguridad.

Ecuación 3: Índice de Riesgo

$$\text{Índice de Riesgo} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6$$

Tabla 20: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Operación.

<b>Proceso</b>	<b>Sub-Proceso</b>	<b>Operación</b>	<b>Índice de Riesgo</b>
Operación Mina	Socavación	Perforación Radial para Socavación	Alto
		Moneo	Alto
		Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Alto
		Tronadura de Tiros Radiales	Alto
	Producción	Carguío LHD	Bajo
		Transporte LHD	Bajo
		Descarga LHD	Bajo
		Reducción Martillo Móvil	Alto
		Reducción Martillo Fijo	Bajo
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo	Bajo
		Limpieza de Cámaras	Bajo
	Transporte	Reducción Martillo Fijo	Bajo
		Transporte por Ferrocarril	Bajo
		Transporte por Correas	Bajo
		Transporte CAEX	Bajo
	Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	Alto

Tabla 21: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Preparación Minera.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Índice de Riesgo
Preparación Minera	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	Alto
		Perforación de Avance Horizontal	Alto
		Limpieza de Zapatera de Frente	Alto
		Carguío de Explosivos	Alto
		Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	Alto
		Ventilación	Bajo
		Chequeo de Frente (gases)	Medio
		Fotogrametría en 3D	Alto
		Regado de Frente	Alto
		Extracción de Marina	Bajo
		Acuñadura Mecanizada	Alto
		Perforación Perno-Cable	Alto
		Anclaje Perno-Cable	Alto
		Instalación y Fraguado de Perno-Cable	Alto
		Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	Alto
		Aplicación de Shotcrete	Alto
		Construcción de Cama de Mineral	Alto
		Limpieza de Pista	Bajo
		Hormigonado de Pista	Alto
		Carpeta de Rodado	Alto
		Instalación Marco en Visera	Alto
		Marcación de Pernos Split-Set	Alto
	Perforación de Pernos Split-Set	Alto	
	Instalación de Pernos Split-Set	Alto	
	Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	Alto
		Red Eléctrica	Alto
		Red Neumática	Alto
		Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	Alto
	Desarrollos Verticales	Raise Borer Drilling	Alto
		Blind Hole Drilling	Alto

Tabla 22: Índice de riesgo de operaciones pertenecientes al proceso de Actividades Auxiliares.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Índice de Riesgo
Actividades Auxiliares	Apoyo	Acuñadura Mecanizada	Alto
		Reducción Secundaria con Martillo Móvil	Alto
		Perforación para Tronadura Secundaria	Alto
		Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	Alto
		Tronadura Secundaria	Alto
		Limpieza Pista	Bajo
		Reparación de Pista	Alto
	Mantenimiento	Infraestructuras	Alto
		Redes	Alto
		Buzones	Alto
		Martillos	Alto
	Abastecimiento	Insumos	Alto

Las operaciones telecomandadas y autónomas presentan un grado de exposición de personal equivalente, ya que en ambas el personal se encuentra en zonas de operación remotas a la faena. Se genera una diferencia en cuanto a la ergonomía de la zona de trabajo y al esfuerzo físico que se lleva a cabo, debido a que las operaciones telecomandadas requieren de personal operando continuamente los equipos dentro de las cabinas de control, exigiendo un esfuerzo mayor que las operaciones autónomas que solo requieren supervisión por parte del personal.

## 6. Evaluación de Impacto en la Producción por Operaciones

Las operaciones mineras tienen como objetivo principal cumplir con el plan de producción respectivo de la manera más eficaz posible, por lo que uno de los principales factores a evaluar en la búsqueda de oportunidades de automatización es el impacto que tiene cada una de ellas en la producción de la mina. La automatización e implementación adecuada de los equipos permite que se ahorre una cantidad de tiempo significativa en la operación, ya que se evitan situaciones de pérdida de tiempo productivo como lo son la realización de protocolos de seguridad o cambios de turno, lo cual aumenta directamente la utilización de los equipos y junto a esto la productividad de los mismos.

El rendimiento de cada operación se mide en distintos KPI debido a que pertenecen a distintos procesos y sub-procesos dentro de la mina los cuales presentan objetivos distintos. Para poder evaluar de manera equivalente las distintas operaciones se desarrolla un Índice de Impacto en Producción (IIP) el cual tiene como objetivo cuantificar el impacto de las operaciones en la producción de la mina independiente del proceso al que estén relacionadas. Para lograr esto, se establece como supuesto que la etapa de preparación minera tiene un impacto equivalente a la etapa de producción, basándose en el hecho que el desarrollo del área a explotar es igual de importante y tiene un peso equivalente en el proyecto que la explotación de la misma.

El rendimiento de las operaciones relacionadas directamente con el proceso de operación se mide con las toneladas por horas (tph) involucradas en cada operación. Mientras que el rendimiento de las operaciones relacionadas con los procesos de preparación minera y actividades auxiliares se cuantifica como el porcentaje de tiempo que cada operación significa del ciclo total de desarrollo del proceso en el cual están directamente involucrados. Es por ello que se establecen los siguientes casos para cuantificar el impacto en producción que presenta cada operación:

- **Etapas de operación:** Se considera el tonelaje involucrado en cada operación de manera individual, independiente si esta se realiza en forma simultánea en distintas áreas, y se contrasta con el máximo tonelaje involucrado en la mina. Se considera el caso de una mina con una tasa de producción de 140.000 [tpd] (Revuelta, 2011), lo que significa una operación de block o panel caving de gran minería.
- **Etapas de desarrollo y preparación minera:** Debido a que en esta etapa involucra distintos tipos de desarrollo se establecen casos distintos para cada uno.
  - Desarrollos horizontales: Se evaluará el rendimiento de las operaciones relacionadas con el ciclo de desarrollo de una sección de 3.2 [m] de galería en su totalidad (fortificación, instalación de redes, etc.). Se evalúan 3.2 [m] ya que esto es el avance promedio por tronadura en una mina de block o panel caving (Camhi, 2012).
  - Desarrollos verticales: Se considerará el tiempo que implica la operación de excavación en el ciclo total de desarrollo, el cual considera la fortificación y entrega final del desarrollo vertical, tomando en cuenta un pique o chimenea de 20 [m] de longitud (Kim, 2019), longitud considerada como promedio en las obras de desarrollos verticales.

- **Operaciones Auxiliares:** Debido a que las operaciones auxiliares y de apoyo no se realizan de manera continua en la operación, ni forman parte del ciclo de preparación y desarrollo, se tomara en cuenta el tiempo en que demora la realización de cada operación y el tiempo promedio que transcurre entre eventos que requieren que se realice este tipo de operaciones.

*Ecuación 4: Índice de Impacto en Producción proceso de Operación.*

$$IIP_{Operación} = \frac{\text{Rendimiento Operación [tph]}}{\text{Producción Total [tph]}} * 100[\%]$$

*Ecuación 5: Índice de Impacto en Producción procesos de Preparación Minera y Actividades Auxiliares.*

$$IIP_{Preparación-Auxiliar} = \frac{\text{Tiempo de Ciclo Operación [hr]}}{\text{Tiempo de Ciclo Total [hr]}} * 100[\%]$$

Para categorizar el impacto en la producción que presenta cada operación de manera individual, se establece un rango basado en el valor del índice de impacto en producción el cual se puede ver en la Tabla 23. El rango de porcentajes se define según las estadísticas obtenidas de los resultados, cabe mencionar que este impacto es el impacto individual que significa cada operación en el proceso independiente de si se realiza de manera paralela en varias zonas o frentes de la mina.

*Tabla 23: Clasificación de impacto en producción.*

<b>Impacto en Producción</b>	<b>Valor Índice de Impacto en Producción</b>
Bajo	0-5%
Medio	5-10%
Alto	>10%

Los datos obtenidos de los rendimientos de cada operación fueron obtenidos de reportes de la industria y de estudios realizados en la mina El Teniente. (Camhi, 2012; Rabajille, 2017 Ccatamayo, 2017; Kim, 2019)

Primero se evalúan las operaciones relacionadas con el proceso de operación de la mina. Para ello se establece un rango de tonelajes típicos dentro de los cuales varía el rendimiento de cada una de las operaciones (Kim, 2019; P. Paredes, 2018; Manzur, 2015). Estos resultados se pueden ver en la Tabla 24.

Tabla 24: Rango de tonelaje involucrado por operación.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Rango de Tonelaje [tph]	
			Min	Max
Operación Mina	Socavación	Perforación Radial para Socavación	9.00	20.00
		Moneo	9.00	20.00
		Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	9.00	20.00
		Tronadura de Tiros Radiales	9.00	20.00
	Producción	Carguío LHD	250.00	350.00
		Transporte LHD	250.00	350.00
		Descarga LHD	250.00	350.00
		Reducción Martillo Móvil	10.00	10.00
		Reducción Martillo Fijo	31.25	43.75
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo	31.25	43.75
		Limpieza de Cámaras	10.00	10.00
	Transporte	Reducción Martillo Fijo	31.25	43.75
		Transporte por Ferrocarril	2000.00	6000.00
		Transporte por Correas	2000.00	6000.00
		Transporte CAEX	600.00	900.00
	Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	250.00	350.00

Luego se procede a calcular el índice de impacto en producción de las operaciones. Para ello se calcula el promedio del rango de tonelajes indicado anteriormente para cada operación y se utiliza como rendimiento representativo de cada una de ellas. Utilizando la Ecuación 4 se obtienen los siguientes resultados mostrados en la Tabla 25, el detalle de esto y de los demás resultados se encuentran en la sección Anexo A.3.

Tabla 25: Índice de impacto en producción proceso de Operación.

Proceso	Sub-Proceso	Operación	Tonelaje [tph]	IIP
Operación Mina	Socavación	Perforación Radial para Socavación	14.5	Bajo
		Moneo	14.5	Bajo
		Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	14.5	Bajo
		Tronadura de Tiros Radiales	14.5	Bajo
	Producción	Carguío LHD	300	Medio
		Transporte LHD	300	Medio
		Descarga LHD	300	Medio
		Reducción Martillo Móvil	10	Bajo
		Reducción Martillo Fijo	37.5	Bajo
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo	37.5	Bajo
		Limpieza de Cámaras	10	Bajo
	Transporte	Reducción Martillo Fijo	37.5	Bajo
		Transporte por Ferrocarril	4000	Alto
		Transporte por Correas	4000	Alto
		Transporte CAEX	750	Alto
	Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	300	Medio

Para las etapas relacionadas con el proceso de preparación y desarrollo minero se analiza cada sub-proceso por separado, debido a que involucran el desarrollo de distintas áreas de trabajo e infraestructuras.

Las operaciones pertenecientes a los sub-procesos de desarrollos horizontales e instalación de redes y TI son incluidas como parte del mismo ciclo ya que se busca evaluar la preparación y desarrollo de la galería en su totalidad. Por lo que se considera como parte del desarrollo de la galería el ciclo convencional de desarrollo de perforación y tronadura, el desarrollo de las obras civiles necesarias para el uso de la galería (carpetas de rodado, hormigonado de pista, etc) y la instalación de redes y TI necesarias para la operación, haciendo de este ciclo de desarrollo horizontal y de instalación de redes un ciclo más largo del que se evalúa tradicionalmente en preparación minera. Se considera el tiempo necesario para realizar cada operación en los 3.2 [m] de galería que se están evaluando, en base a esto se obtienen los siguientes datos obtenidos de la industria y de estudios realizados (Camhi, 2012; Rabajille, 2017; Ccatamayo, 2017; Contreras, 2016), estos datos pueden ser vistos en la Tabla 26.

Tabla 26: Tiempo de ciclo por operación involucrada en sub-proceso Desarrollos Horizontales

Sub-Proceso	Operación	Tiempo de Ciclo [hr]
Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	0.50
	Perforación de Avance Horizontal	2.92
	Limpieza de Zapatera de Frente	0.50
	Carguío de Explosivos	1.33
	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	0.50
	Ventilación	0.75
	Chequeo de Frente (gases)	0.25
	Fotogrametría en 3D	0.25
	Regado de Frente	0.33
	Extracción de Marina	2.33
	Acuñadura Mecanizada	0.50
	Perforación Perno-Cable	1.33
	Anclaje Perno-Cable	1.00
	Instalación y Fraguado de Perno-Cable	1.00
	Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	0.83
	Aplicación de Shotcrete	0.50
	Construcción de Cama de Mineral	0.50
	Limpieza de Pista	0.50
	Hormigonado de Pista	15.60
	Carpeta de Rodado	24.00
Marcación de Pernos Split-Set	0.25	
Perforación de Pernos Split-Set	0.25	
Instalación de Pernos Split-Set	0.17	
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	0.25
	Red Eléctrica	0.25
	Red Neumática	0.25
	Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	0.25

A partir de estos datos se obtiene que el tiempo total de ciclo de preparación y desarrollo de la sección de galería es de 57.10 horas, tiempo el cual se considerara como el ciclo total para calcular el índice de impacto en producción que representa cada una de las operaciones pertenecientes a estos sub-procesos. Esto basado en los antecedentes de tiempos de ciclo obtenidos (Camhi, 2012; Rabajille, 2017; Ccatamayo, 2017).

En cuanto al desarrollo de marcos y viseras en los desarrollos horizontales se considera un ciclo aparte para estos desarrollos ya que no están involucrados en el desarrollo de galerías, sino que en zonas específicas. Se considera que el ciclo total de estos desarrollos es de 110 [hrs] y el tiempo de la operación instalación marco en visera es de 54 [hrs] respectivamente (Camhi, 2012).

Para los desarrollos verticales se considera el desarrollo de un pique o chimenea de 20 [m] de longitud, tomando en cuenta la excavación a través de los métodos de *blind hole drilling* o *raise borer drilling* que son los utilizados actualmente en minería subterránea. El ciclo total de desarrollo vertical considera la acuñadura y fortificación del desarrollo, lo cual se traduce en un tiempo total de ciclo de 130 horas y de 147 horas para las operaciones de raise borer y blind hole respectivamente (Chaparro, 2018).

Para el caso de las operaciones involucradas en el proceso de actividades auxiliares se analiza, como se mencionó previamente, el tiempo que involucra el desarrollo de esta en comparación con la frecuencia de tiempo en que estas se llevan a cabo debido a que no son operaciones que se realizan de manera constante o cíclica en la mina. Se establece que las operaciones involucradas en los sub-procesos de apoyo y mantenimiento se llevan a cabo en promedio cada 1000 [hrs], mientras que las operaciones involucradas en el sub-proceso de abastecimiento se realizan cada 12 [hrs] (Salvador, 2018), equivalente al cambio de turno en la operación. Estos tiempos serán considerados como los tiempos de ciclo total de para cada operación. En la Tabla 27 se muestran los tiempos involucrados para la realización de cada una de las operaciones en específico.

Tabla 27: Tiempo de ciclo de operaciones pertenecientes al proceso Actividades Auxiliares

Sub-Proceso	Operación	Tiempo de Ciclo [hr]
Apoyo	Acuñadura Mecanizada	0.50
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	0.50
	Perforación para Tronadura Secundaria	2.92
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	0.50
	Tronadura Secundaria	0.50
	Limpieza Pista	0.50
	Reparación de Pista	0.50
Mantenimiento	Infraestructuras	12.00
	Redes	12.00
	Buzones	12.00
	Martillos	12.00
Abastecimiento	Insumos	0.75

A partir de estos datos se procede a calcular el índice de impacto en producción respectivo para cada operación perteneciente a los procesos de preparación minera y actividades auxiliares utilizando la Ecuación 5. Los resultados obtenidos son mostrados en la Tabla 28 y Tabla 29.

Tabla 28: Índice de impacto en producción operaciones pertenecientes al proceso Preparación Minera

Proceso	Sub-Proceso	Operación	IIP
Preparación Minera	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	Bajo
		Perforación de Avance Horizontal	Medio
		Limpieza de Zapatera de Frente	Bajo
		Carguío de Explosivos	Bajo
		Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	Bajo
		Ventilación	Bajo
		Chequeo de Frente (gases)	Bajo
		Fotogrametría en 3D	Bajo
		Regado de Frente	Bajo
		Extracción de Marina	Bajo
		Acuñadura Mecanizada	Bajo
		Perforación Perno-Cable	Bajo
		Anclaje Perno-Cable	Bajo
		Instalación y Fraguado de Perno-Cable	Bajo
		Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	Bajo
		Aplicación de Shotcrete	Bajo
		Construcción de Cama de Mineral	Bajo
		Limpieza de Pista	Bajo
		Hormigonado de Pista	Alto
		Carpeta de Rodado	Alto
		Instalación Marco en Visera	Alto
		Marcación de Pernos Split-Set	Bajo
		Perforación de Pernos Split-Set	Bajo
	Instalación de Pernos Split-Set	Bajo	
	Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	Bajo
		Red Eléctrica	Bajo
		Red Neumática	Bajo
		Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	Bajo
	Desarrollos Verticales	Raise Borer Drilling	Alto
Blind Hole Drilling		Alto	

Tabla 29: Índice de impacto en producción de operaciones pertenecientes a proceso de Actividades Auxiliares.

<b>Proceso</b>	<b>Sub-Proceso</b>	<b>Operación</b>	<b>IIP</b>
Actividades Auxiliares	Apoyo	Acuñadura Mecanizada	Bajo
		Reducción Secundaria con Martillo Móvil	Bajo
		Perforación para Tronadura Secundaria	Bajo
		Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	Bajo
		Tronadura Secundaria	Bajo
		Limpieza Pista	Bajo
		Reparación de Pista	Bajo
	Mantenimiento	Infraestructuras	Bajo
		Redes	Bajo
		Buzones	Bajo
		Martillos	Bajo
	Abastecimiento	Insumos	Medio

## 7. Selección de Oportunidades de Automatización

Se procede a realizar la selección de las operaciones más tentativas a automatizar en base a los resultados obtenidos anteriormente:

- Años necesarios para automatizar la operación.
- Índice de riesgo.
- Índice de impacto en producción.

Se realiza un análisis de la evolución del índice de riesgo según los años requeridos para telecomandar y automatizar cada operación. En base a esto se puede ver que operaciones presentan un mayor índice de riesgo y la posibilidad de disminuirlo con los desarrollos de la tecnología en una cierta cantidad de años.

Primero se presenta una evaluación comparativa entre los sub-procesos y la cantidad de años para automatizar cada uno. Debido a que los sub-procesos representan una gran cantidad de operaciones individuales, se calcula un promedio del índice de riesgo y de la cantidad de años para telecomandar y automatizar, los cuales se pueden ver en la Tabla 30 y Tabla 31.

*Tabla 30: Evolución de índice de riesgo promedio por sub-proceso.*

Sub-Proceso	Índice de Riesgo		
	Base	Telecomandado	Automatización*
Socavación	8.63	2.00	0.00
Producción	2.45	1.20	0.00
Traspaso	2.00	2.00	0.00
Transporte	1.00	1.00	0.00
Infraestructura	8.00	2.00	0.00
Desarrollos Horizontales	8.32	1.92	0.00
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	7.75	2.00	0.00
Desarrollos Verticales	9.50	2.00	0.00
Apoyo	8.00	2.00	0.00
Mantenimiento	7.50	2.00	0.00
Abastecimiento	7.00	2.00	0.00

\*Se entrega un valor de cero para el caso autónomo, ya que se evalúan los sub-procesos. Por lo que el valor promedio del índice en el estado autónomo es de cero para la mayoría de las operaciones, exceptuando a ciertos casos individuales.

Tabla 31: Años para telecomandar y automatizar promedio por sub-proceso.

Sub-Proceso	Esfuerzo de Automatización		
	Base	Telecomandada	Automatización
Socavación	0.00	4.96	5.49
Producción	0.00	1.05	2.15
Traspaso	0.00	0.00	3.96
Transporte	0.00	0.00	1.22
Infraestructura	0.00	8.00	14.00
Desarrollos Horizontales	0.00	3.56	5.38
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	0.00	8.00	14.00
Desarrollos Verticales	0.00	5.26	8.21
Apoyo	0.00	3.23	5.70
Mantenimiento	0.00	8.00	14.00
Abastecimiento	0.00	8.00	14.00

En el siguiente gráfico, se puede apreciar una representación de los resultados mostrados en la tabla anterior. Se define como “Base” al estado actual en el que se encuentran las operaciones, al cual se le asigna la cantidad de cero en la cantidad de años. En la Figura 23 se puede ver el gráfico de Índice de Riesgo v/s Años para Automatizar, el primer punto hace referencia al caso base o estado actual, el segundo a la operación telecomandada y el tercero a la operación automatizada. Las operaciones que solo muestren dos puntos hacen referencia a operaciones que se encuentran telecomandadas actualmente y solo requieren ser automatizadas.

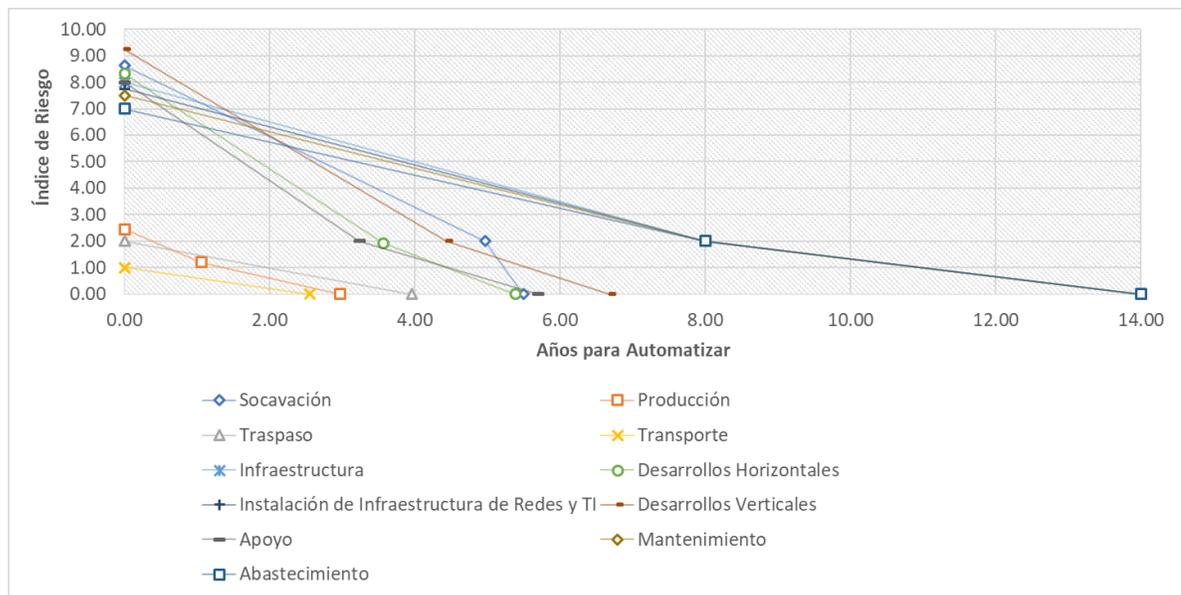


Figura 23: Índice de riesgo vs Años para automatizar por sub-proceso.

Se ve que los sub-procesos de producción, transporte y traspaso son los que presentan el menor índice de riesgo y los que requieren la menor cantidad de años para telecomandar y automatizar sus operaciones en promedio. Esto se relaciona a que la mayoría de las operaciones pertenecientes a estos sub-procesos se encuentra en estado telecomandado o autónomo y las operaciones que se encuentran en estado manual son realizadas en cabina o el personal se encuentra en cierta manera menos expuesto a los riesgos de la operación, por lo que presentan un bajo índice de riesgo.

Los sub-procesos de apoyo, desarrollos horizontales, desarrollos verticales y socavación presentan un índice de riesgo mucho mayor a los sub-procesos mencionados anteriormente debido a que casi la totalidad de sus operaciones se realizan de manera manual como se vio en la sección anterior, pero es posible telecomandar y automatizar casi la totalidad de sus operaciones dentro del rango de 4-6 años, lo cual las hace tentativas a evaluar en busca de operaciones a automatizar debido a que resultaría en una disminución significativa de la exposición del personal en una baja cantidad de años. Cabe mencionar que las operaciones de relacionadas a desarrollos verticales, desarrollos verticales y socavación son intensivas en el uso de personal, lo cual las hace más tentativas a evaluar.

Por último, los sub-procesos de abastecimiento, mantenimiento, instalación de infraestructura de redes y TI e infraestructura presentan un índice de riesgo alto al igual que los sub-procesos mencionados anteriormente, pero requieren una cantidad de años mayor para telecomandar y automatizar sus operaciones. Esto se debe principalmente a que las operaciones que se realizan en estos sub-procesos son muy variables y los equipos utilizados son mayoritariamente de apoyo para las labores que realiza el personal, siendo las actividades principales de los procesos realizadas por el personal. Esto hace que estos sub-procesos sean menos tentativos a evaluar en busca de operaciones a automatizar debido a la gran dificultad que significa hacerlo.

En la Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se muestran una serie de gráficos de Índice de Riesgo v/s Años para Automatizar evaluando las operaciones presentes en cada sub-proceso de manera individual.

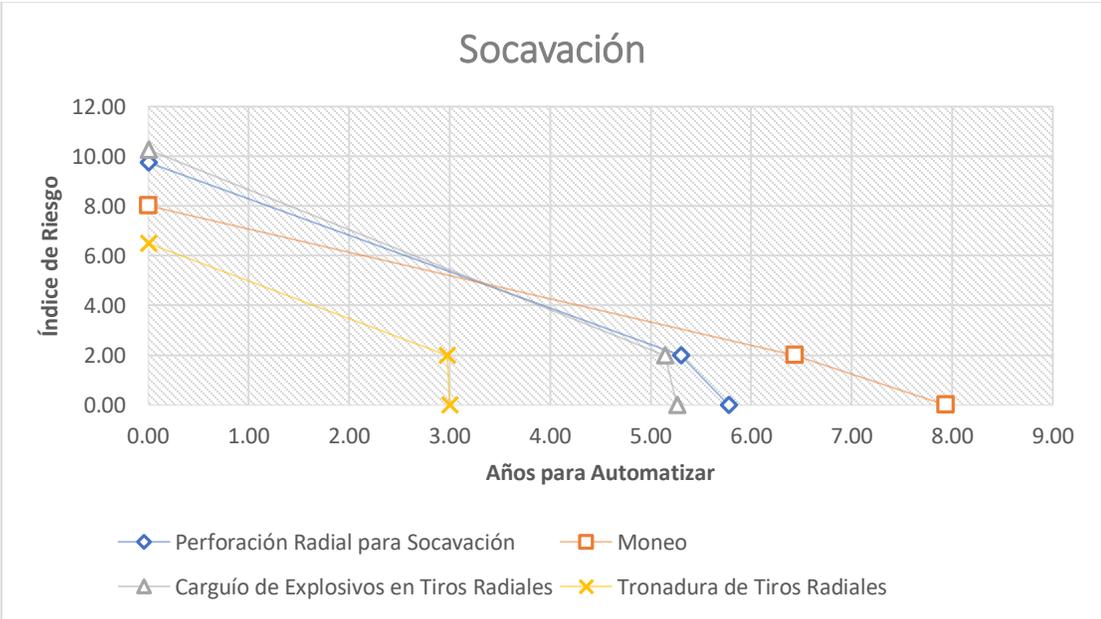


Figura 24: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Socavación.

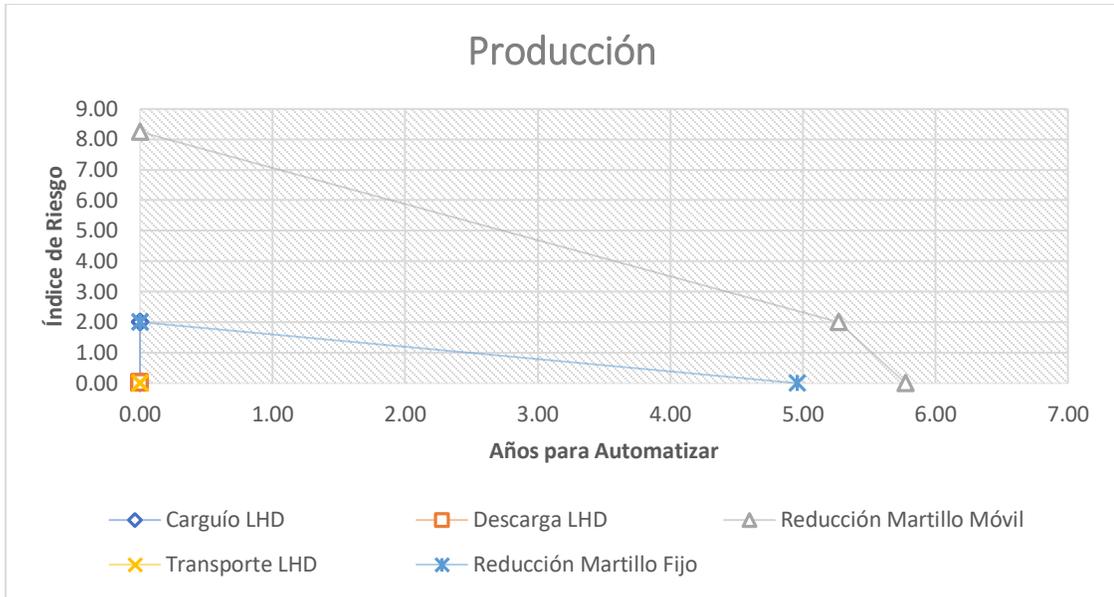


Figura 25: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Producción.

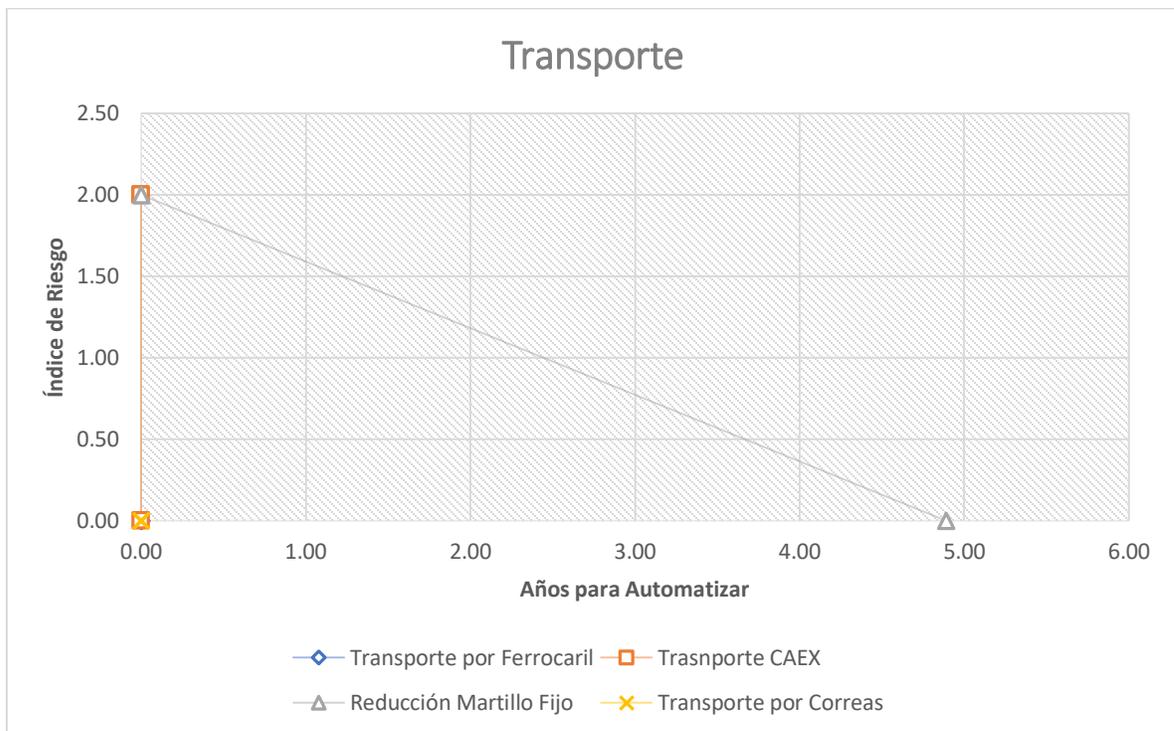


Figura 26: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Transporte.

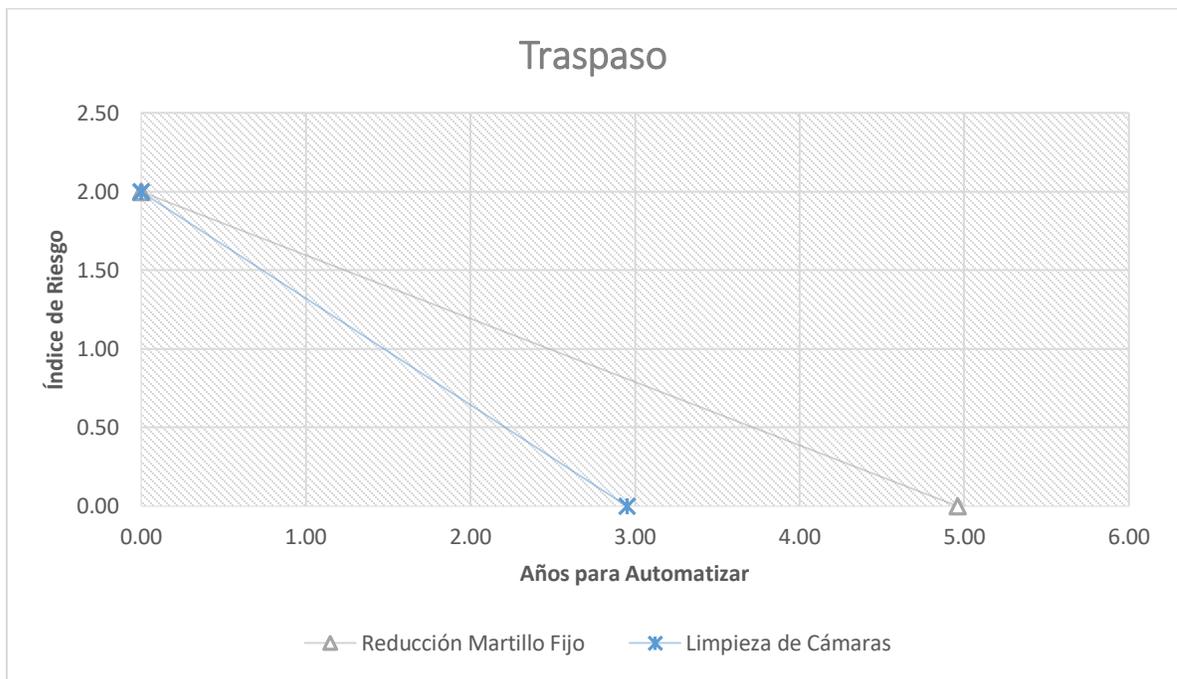


Figura 27: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Traspaso.

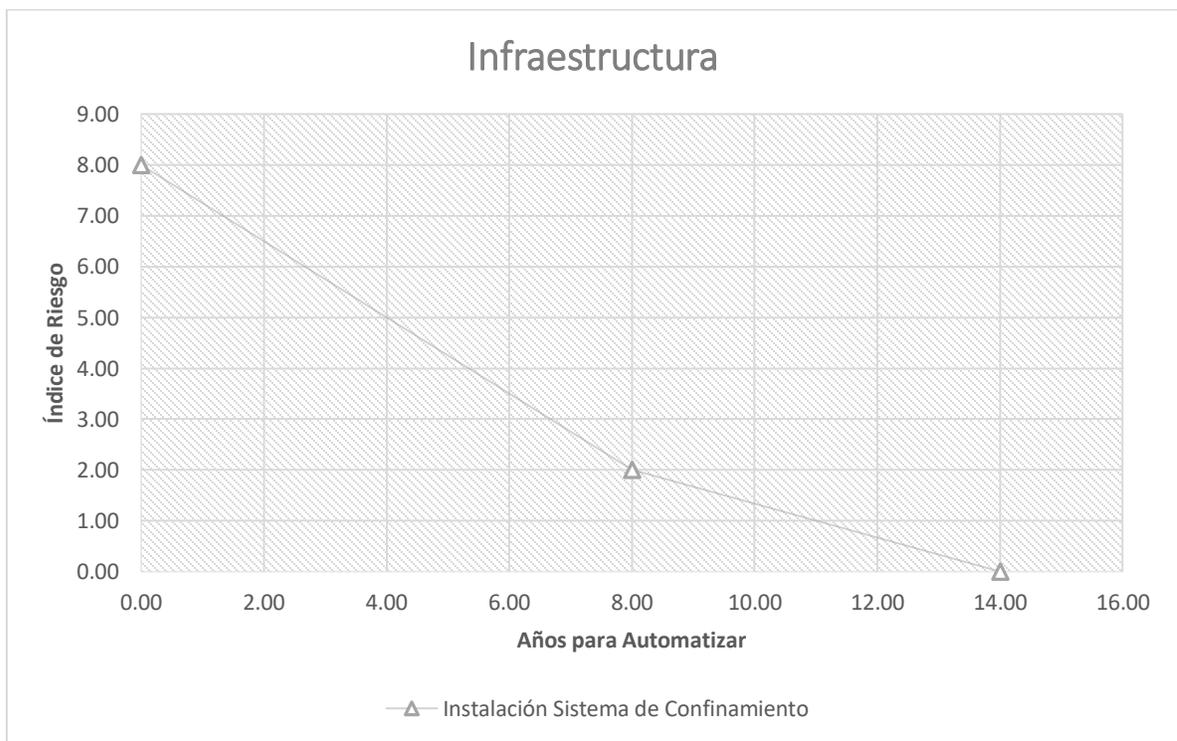


Figura 28: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Infraestructura.

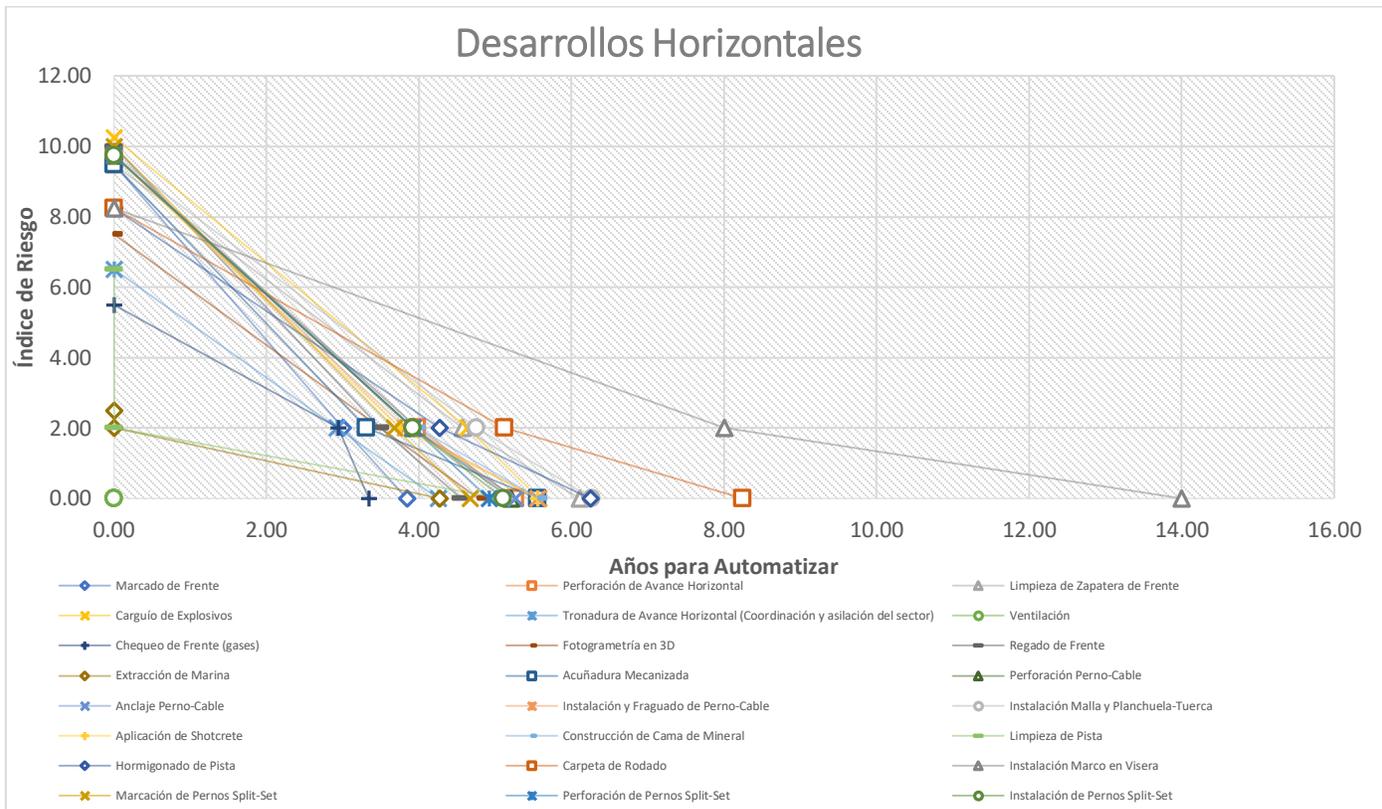


Figura 29: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Desarrollos Horizontales.

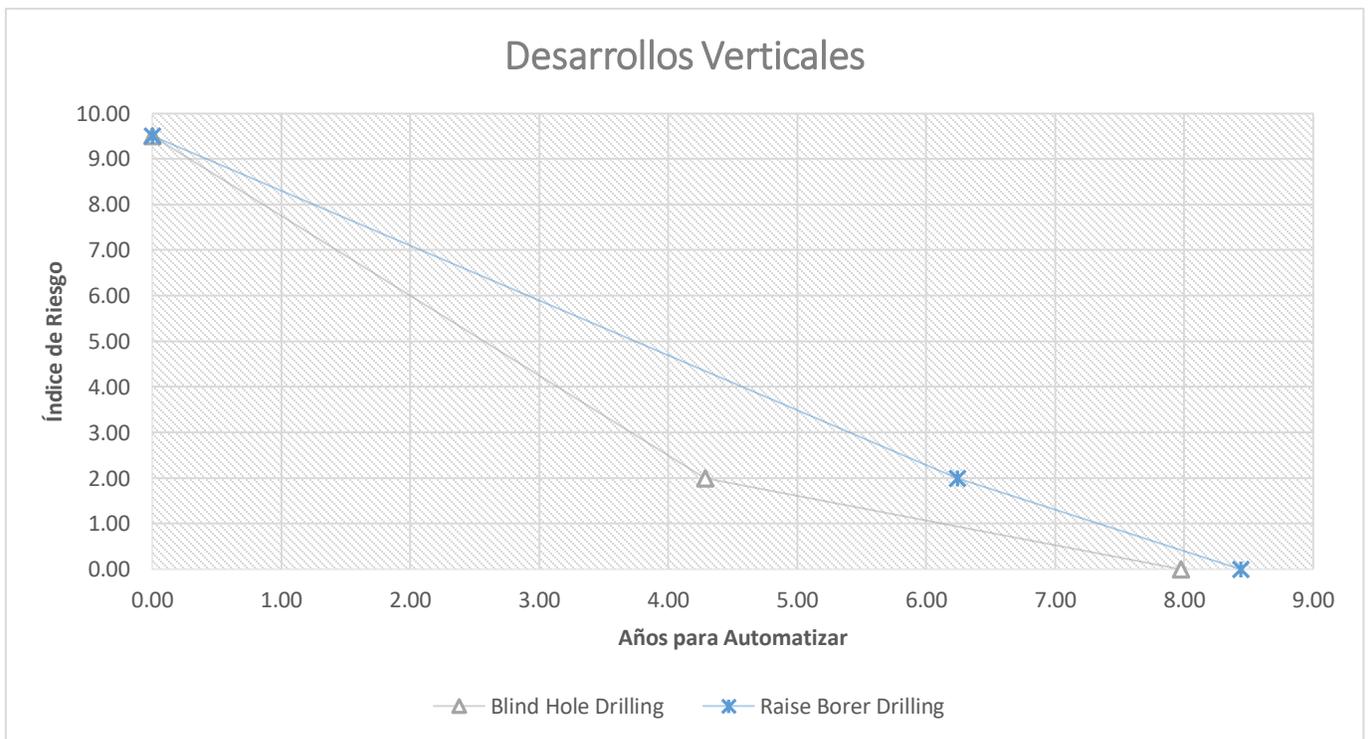


Figura 30: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Desarrollos Verticales.

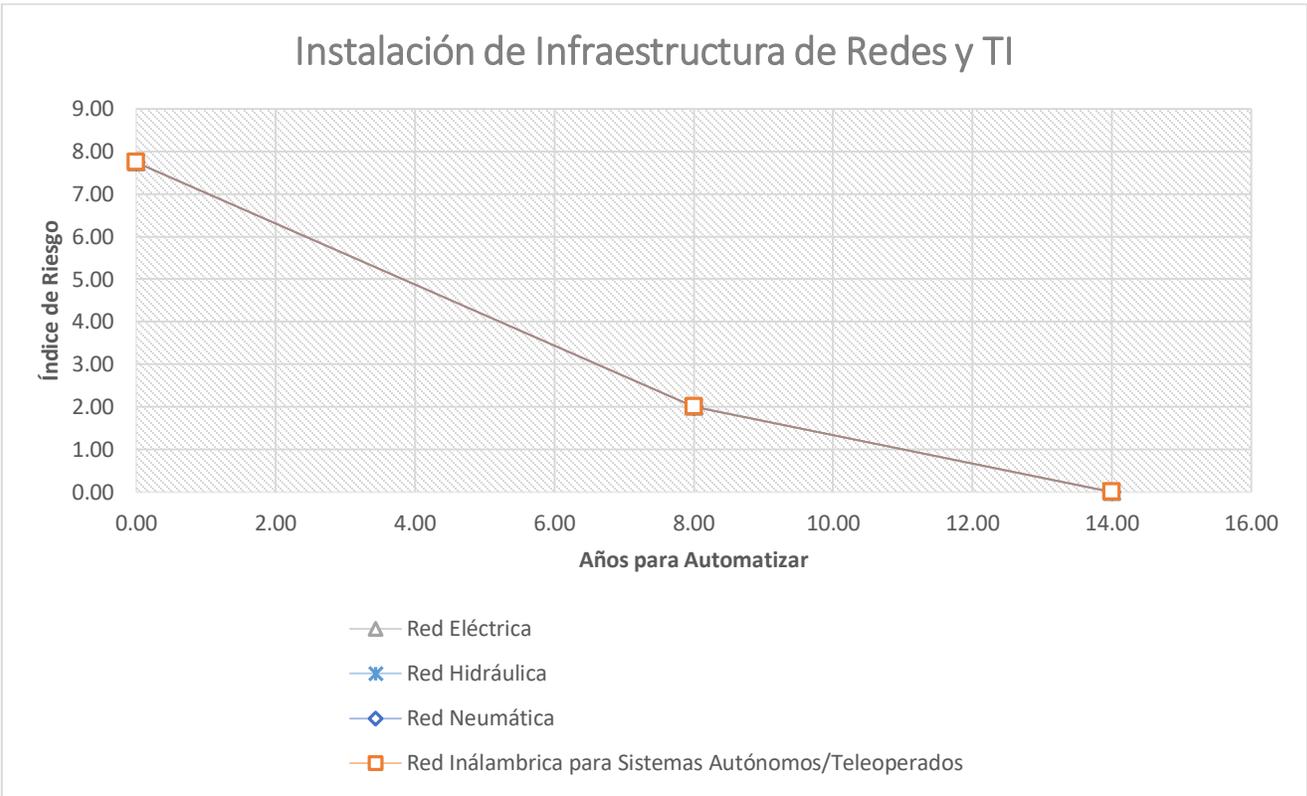


Figura 31: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Instalación de Infraestructuras de Redes y TI.

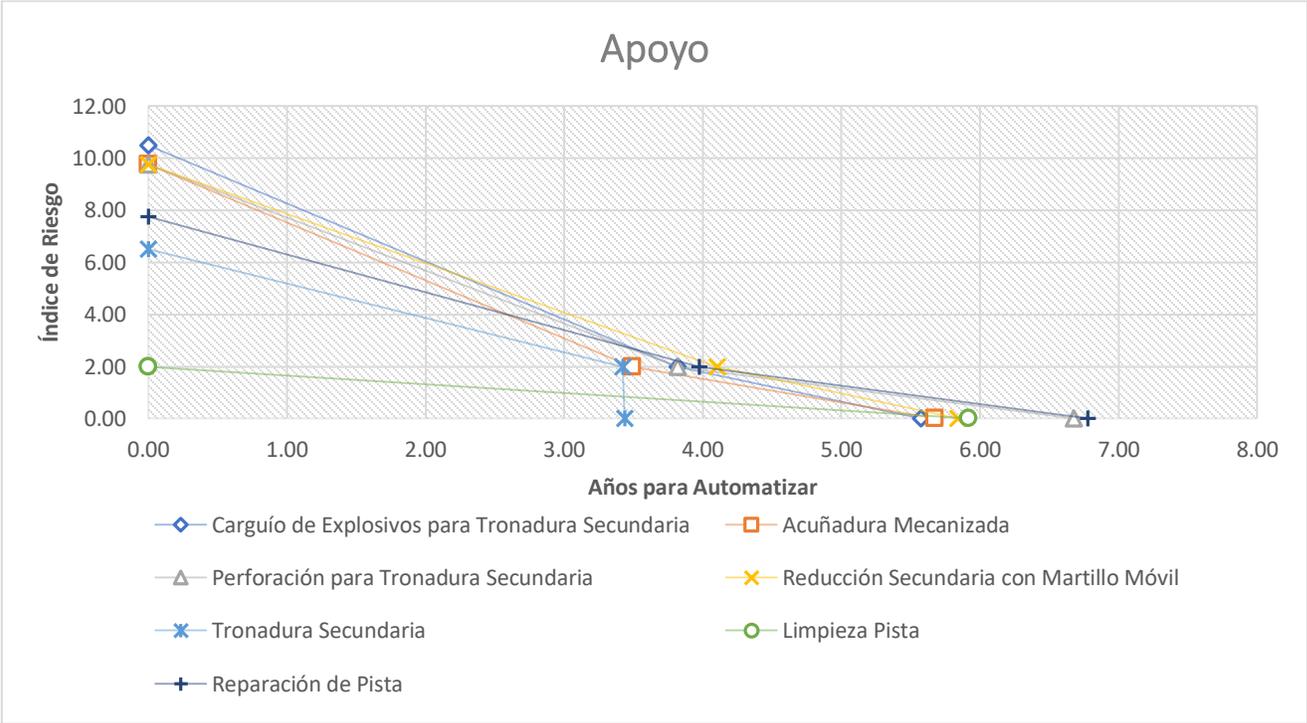


Figura 32: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Apoyo.

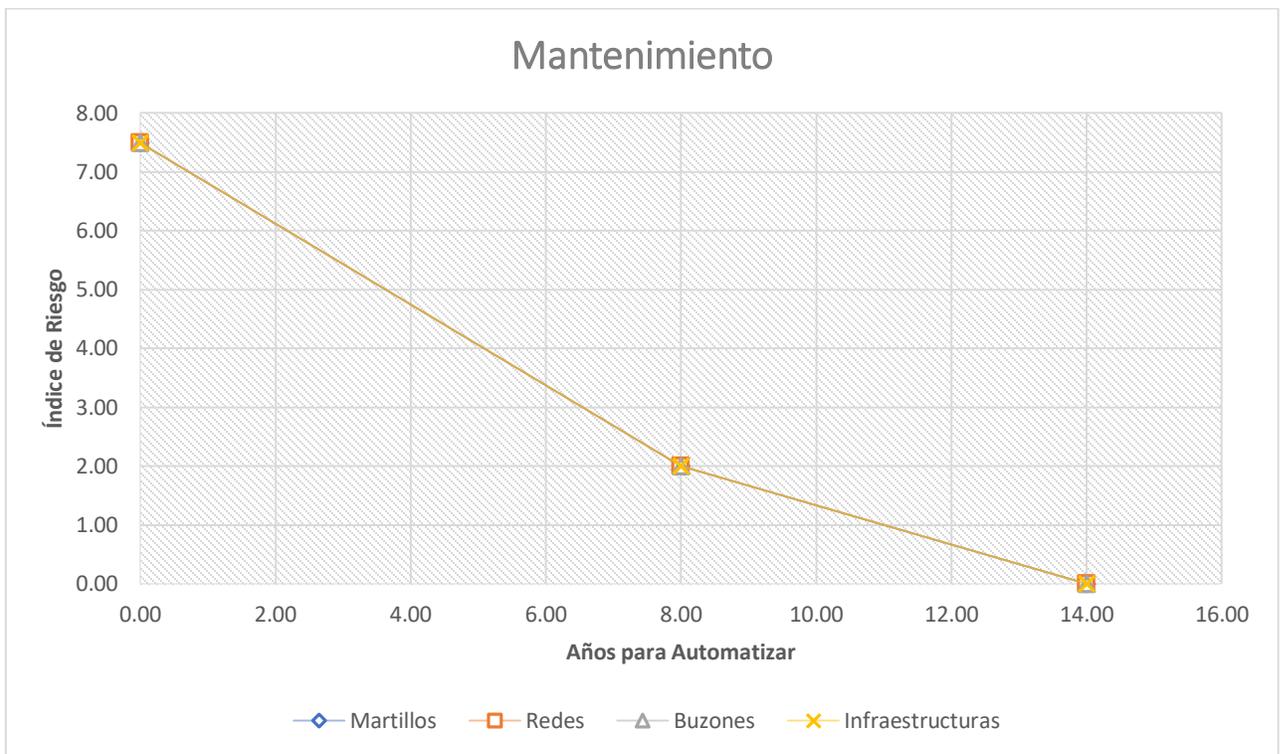


Figura 33: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Mantenimiento.

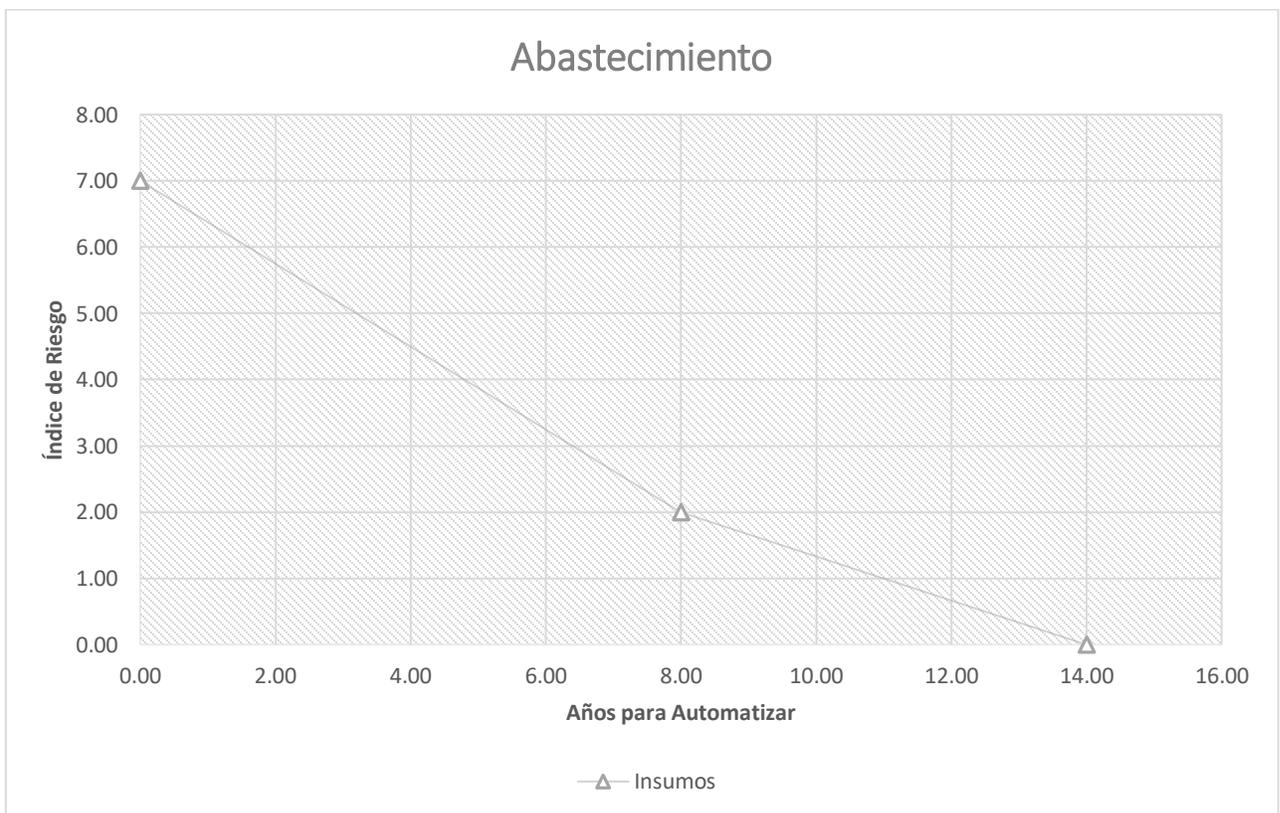


Figura 34: Índice de riesgo vs Años para automatizar sub-proceso de Abastecimiento.

Luego se realiza un análisis comparativo entre el índice de impacto en producción obtenido para cada operación con la cantidad de años necesarios para telecomandar y automatizar cada una de ellas. Se efectúa el análisis categorizando las operaciones con los rangos de años previamente definidos en la estimación. También se incluye el índice de riesgo calculado, el cual se puede visualizar como el tamaño del círculo que representa cada operación en el gráfico, siendo a mayor tamaño más grande el índice de riesgo.

Se asoció una serie de operaciones bajo una misma categoría debido a que están directamente relacionadas la una con la otra, ya sea porque son realizadas por un mismo equipo o por que se realiza de manera intercalada o paralela con la otra operación, por lo que si se automatiza una es necesario automatizar la otra. En base a esto, se calculó un promedio de los índices y de los años para telecomandar y automatizar entre las operaciones relacionadas bajo una misma categoría y se estableció ese resultado con el representativo para ellas. Las operaciones asociadas y las categorías definidas son mostradas a continuación en la Tabla 32 y Tabla 33, el detalle puede ser visto en el Anexo A.4.

Tabla 32: Operaciones asociadas para evaluación, índice de riesgo/índice de impacto en producción.

<b>Categoría</b>	<b>Sub-Proceso</b>	<b>Operación Asociada</b>	<b>Índice de Riesgo</b>	<b>IIP</b>
Perforación de Avance	Socavación	Perforación Radial para Socavación	Alto	Medio
	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Avance Horizontal		
Carguío de Explosivos	Socavación	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Alto	Bajo
	Desarrollos Horizontales	Carguío de Explosivos		
	Apoyo	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria		
Tronadura	Socavación	Tronadura de Tiros Radiales	Alto	Bajo
	Desarrollos Horizontales	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)		
	Apoyo	Tronadura Secundaria		
Reducción Martillo Fijo	Producción	Reducción Martillo Fijo	Bajo	Bajo
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo		
	Transporte	Reducción Martillo Fijo		
LHD Preparación	Traspaso	Limpieza de Cámaras	Bajo	Medio
	Desarrollos Horizontales	Limpieza de Pista		
	Apoyo	Limpieza Pista		
	Desarrollos Horizontales	Extracción de Marina		
Acuñadura Mecanizada	Desarrollos Horizontales	Acuñadura Mecanizada	Alto	Bajo
	Apoyo	Acuñadura Mecanizada		
Perforación y Fortificación de Pernos	Desarrollos Horizontales	Perforación Perno-Cable	Alto	Medio
	Desarrollos Horizontales	Anclaje Perno-Cable		
	Desarrollos Horizontales	Instalación y Fraguado de Perno-Cable		
	Desarrollos Horizontales	Marcación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Instalación de Pernos Split-Set		
Reducción Martillo Móvil	Producción	Reducción Martillo Móvil	Alto	Bajo
	Apoyo	Reducción Secundaria con Martillo Móvil		

Tabla 33: Operaciones asociadas para evaluación, años para telecomandar/automatizar.

Categoría	Sub-Proceso	Operación Asociada	Años Promedio	
			Telecomandar	Automatizar
Perforación de Avance	Socavación	Perforación Radial para Socavación	4.02	5.39
	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Avance Horizontal		
Carguío de Explosivos	Socavación	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	4.53	5.47
	Desarrollos Horizontales	Carguío de Explosivos		
	Apoyo	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria		
Tronadura	Socavación	Tronadura de Tiros Radiales	3.11	3.56
	Desarrollos Horizontales	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)		
	Apoyo	Tronadura Secundaria		
Reducción Martillo Fijo	Producción	Reducción Martillo Fijo	0.00	4.94
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo		
	Transporte	Reducción Martillo Fijo		
LHD Preparación	Traspaso	Limpieza de Cámaras	0.00	4.55
	Desarrollos Horizontales	Limpieza de Pista		
	Apoyo	Limpieza Pista		
	Desarrollos Horizontales	Extracción de Marina		
Acuñadura Mecanizada	Desarrollos Horizontales	Acuñadura Mecanizada	3.40	5.61

	Apoyo	Acuñadura Mecanizada		
Perforación y Fortificación de Pernos	Desarrollos Horizontales	Perforación Perno-Cable	3.86	5.12
	Desarrollos Horizontales	Anclaje Perno-Cable		
	Desarrollos Horizontales	Instalación y Fraguado de Perno-Cable		
	Desarrollos Horizontales	Marcación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Instalación de Pernos Split-Set		
Reducción Martillo Móvil	Producción	Reducción Martillo Móvil	4.10	5.84
	Apoyo	Reducción Secundaria con Martillo Móvil		

A continuación, se muestran en los gráficos presentes en la Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38 y Figura 39 los resultados obtenidos del análisis comparativo entre el índice de impacto en producción y la cantidad de años para desarrollar las tecnologías.

En los casos presentes en la Figura 35 y Figura 36 se puede apreciar que las distintas operaciones presentan un nivel de riesgo equivalente, siendo este un nivel alto de exposición al riesgo de personal.

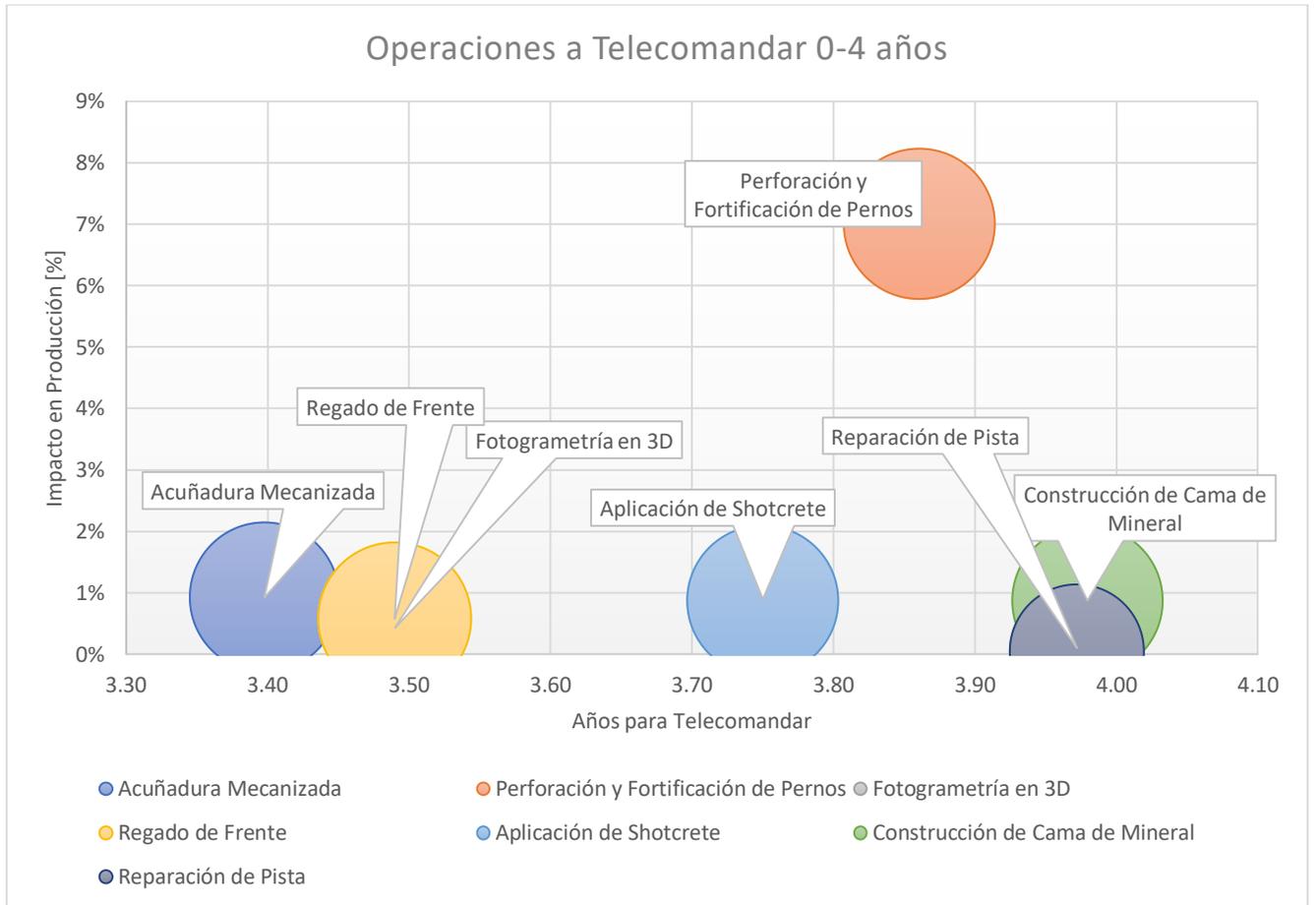


Figura 35: Impacto en producción vs Años para telecomandar (0-4 años).

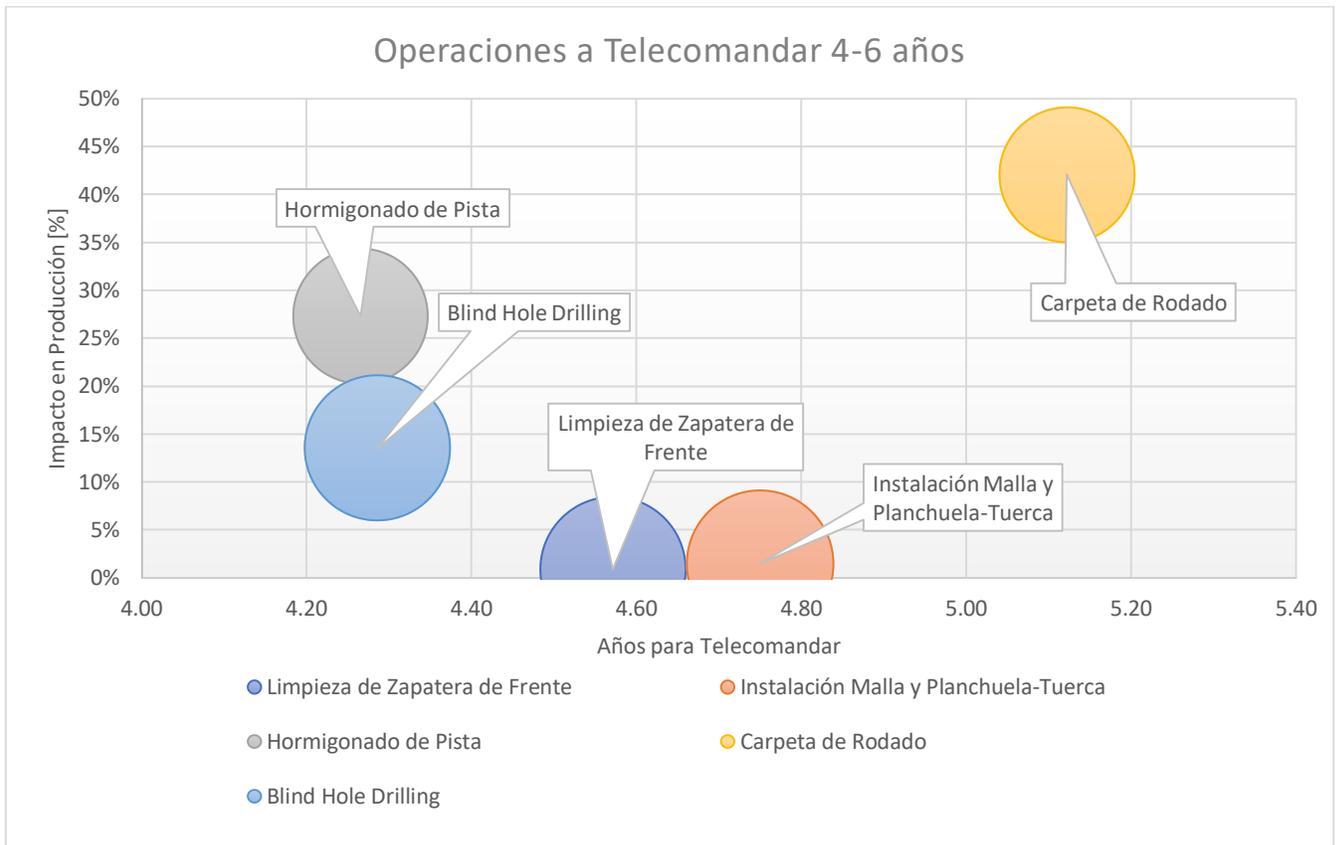


Figura 36: Impacto en producción vs Años para telecomandar (4-6 años).

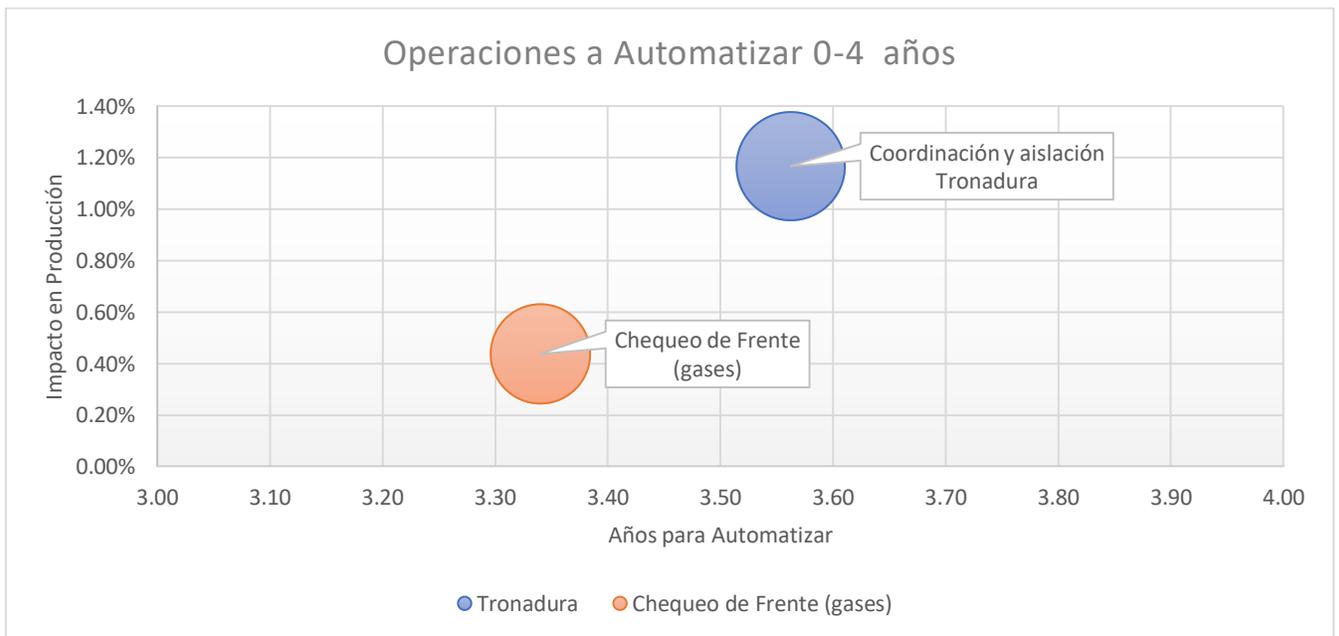


Figura 37: Impacto en producción vs Años para automatizar (0-4 años).

## Operaciones a Automatizar (4-6 años)

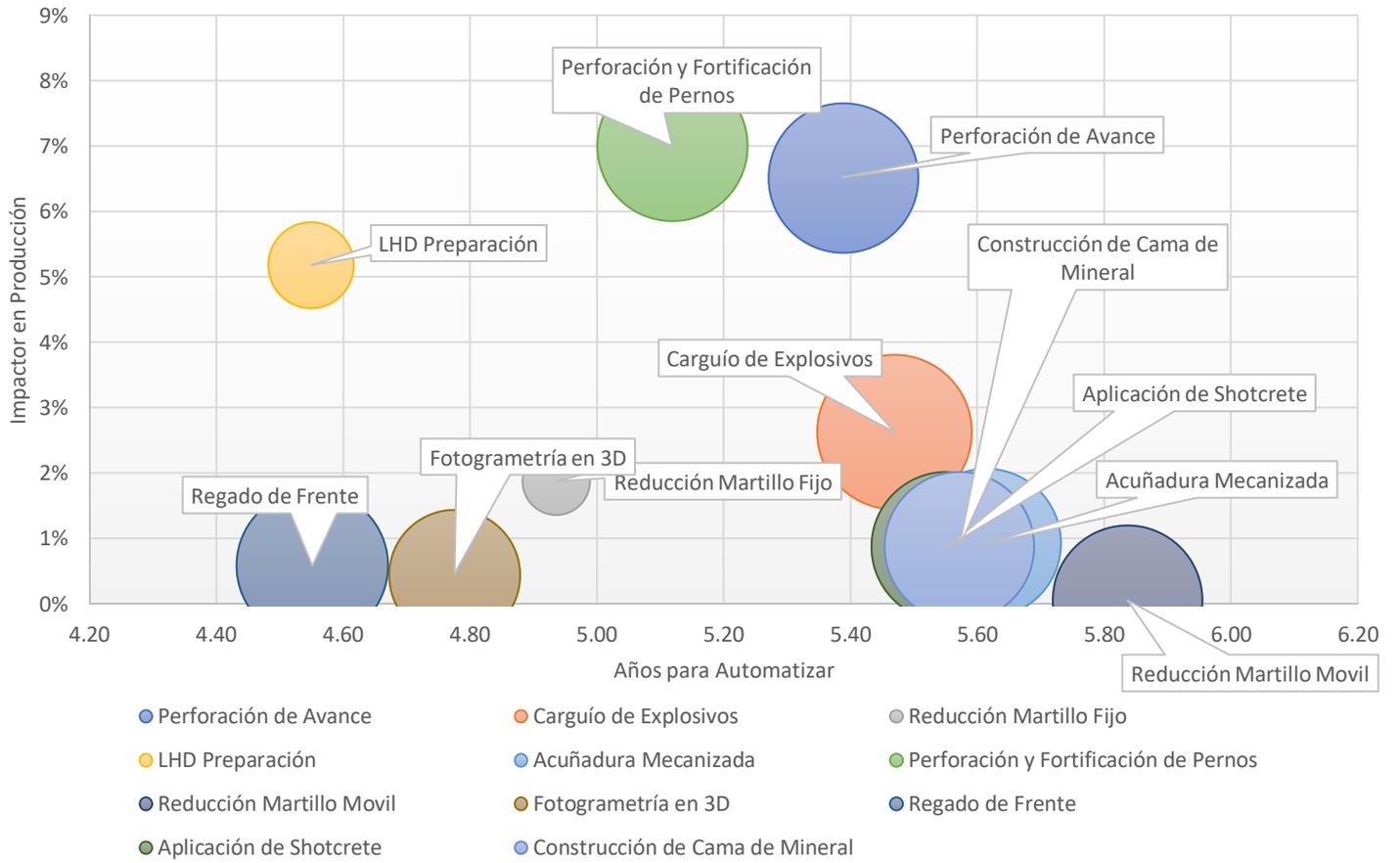


Figura 38: Impacto en producción vs Años para automatizar (4-6 años).

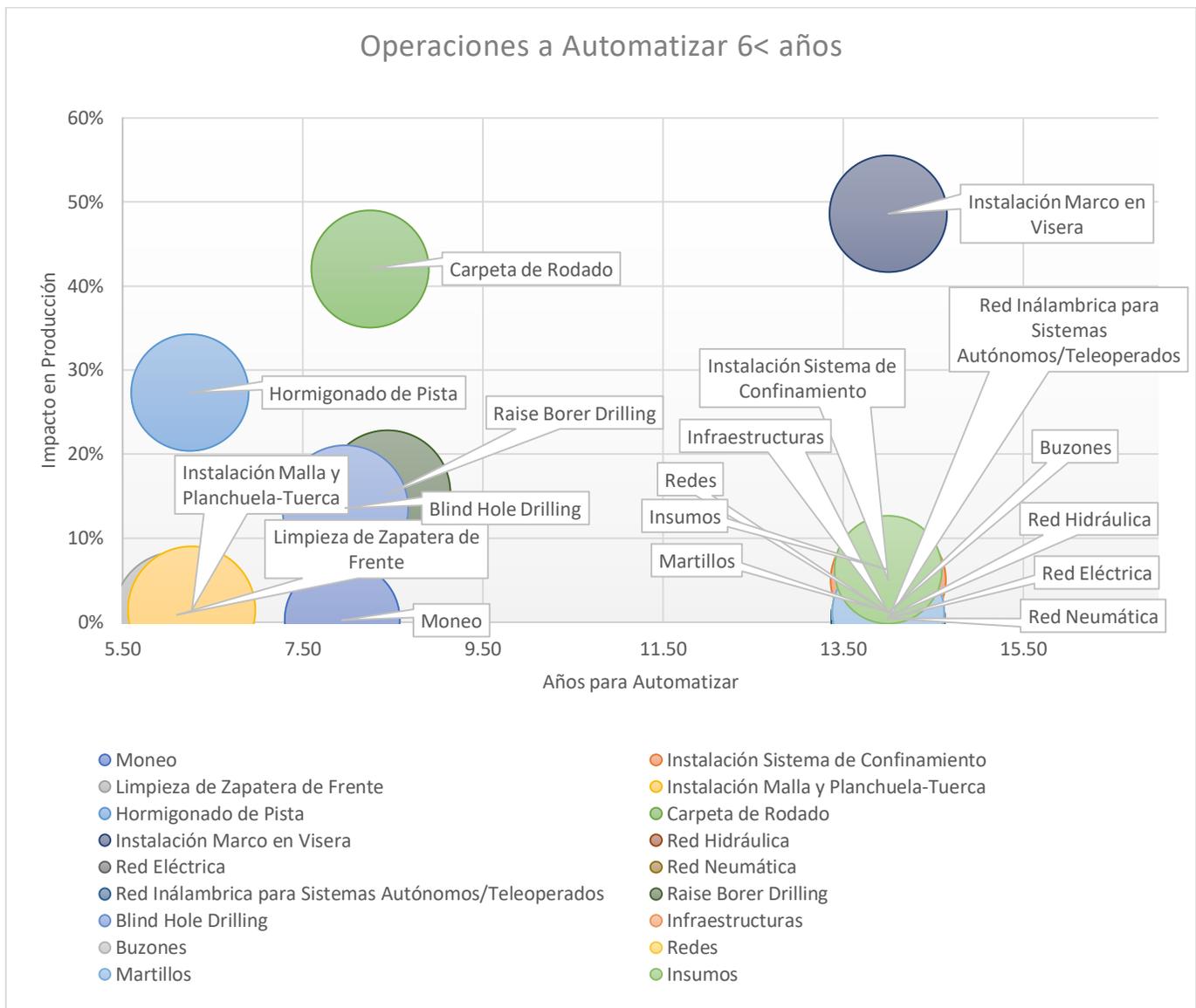


Figura 39: Impacto en producción vs Años para automatizar (6< años)

En base a los gráficos obtenidos se puede apreciar que existe una gran cantidad de operaciones factibles a telecomandar en el corto y mediano plazo, las cuales presentan un gran índice de impacto en la producción o un gran índice de riesgo. Aunque para los temas de estudio, se priorizar la automatización de las operaciones al desarrollo de la tecnología telecomandada, ya que esta presenta un mayor beneficio a la operación.

Las operaciones factibles a automatizar en el corto plazo (0-4 años) no son tan atractivas para automatizar ya que presentan un índice de impacto en la producción demasiado bajo y hacen referencia a operaciones aisladas que involucran un bajo uso de personal.

En cambio, las operaciones factibles a automatizar en el mediano plazo (4-6 años) son interesantes para llevar a cabo un análisis futuro de su automatización. Esto se debe a que representan un gran impacto en la producción, al mismo tiempo son operaciones que representan una gran exposición

del personal al riesgo y son intensivas en el uso de personal y también requieren una cantidad de tiempo relativamente corto para desarrollar la tecnología, lo que hace a estas operaciones candidatas a evaluar en mayor profundidad los beneficios de su automatización.

Por último, las operaciones no factibles a automatizar en el corto y mediano plazo (>6 años) no son atractivas para analizar en mayor profundidad en este estudio, ya que, aunque presenten un impacto en la producción considerable y un nivel de exposición al riesgo del personal similar a las operaciones de mediano plazo, la cantidad de tiempo necesario para el desarrollo de la tecnología es incierto (podría no ser factible automatizar dichas operaciones en varias décadas) por lo que si en los otros indicadores los resultados son similares es mejor evaluar la oportunidad que brindan las operaciones del mediano plazo.

Según los criterios presentados, las operaciones más atractivas a automatizar son las mostradas a continuación en la Tabla 34.

*Tabla 34: Operaciones tentativas para evaluar automatización.*

<b>Operación</b>	<b>Índice de Riesgo</b>	<b>Esfuerzo de Automatización [años]</b>	<b>Impacto en Producción</b>
LHD Preparación	Medio	4	Medio
Carguío de Explosivos	Alto	5	Bajo
Perforación y Fortificación de Pernos	Alto	5	Medio
Perforación de Avance	Alto	5	Medio

Se eligieron estas operaciones para continuar con el análisis cualitativo y cuantitativo de su automatización debido a que son las operaciones factibles a automatizar en el mediano plazo con el mayor índice de impacto en producción, un índice de riesgo mayor o sobre el promedio y una cantidad de tiempo para automatizar medio o bajo. Al mismo tiempo, la mayoría de estas operaciones son parte de las categorías previamente definidas, por lo que la evaluación de automatización las incluye a ellas también.

## 8. Evaluación de Operaciones Seleccionadas

Se realiza una evaluación de las modificaciones que se generarían al automatizar las operaciones seleccionadas. La estimación realizada es de carácter teórico debido a que para los alcances de este estudio no es posible llevar a cabo el desarrollo e implementación de la tecnología para poder verificar los cambios operacionales. Esta evaluación se fue realizada en conjunto con los miembros del Laboratorio de robótica de campo, perteneciente al grupo de Automatización en Minería del AMTC\*.

Se analizarán los cambios que se generan en:

- Protocolos de operación.
- Consumo de insumos.
- Tiempos de ciclo.
- Requerimiento de cambios o incorporación de infraestructura.
- Requerimiento y tareas del personal.

En la Tabla 35 se muestra en detalle las operaciones seleccionadas para evaluar su posible automatización.

*Tabla 35: Operaciones seleccionadas para evaluar su automatización.*

<b>Categoría</b>	<b>Sub-Proceso</b>	<b>Operación Asociada</b>
Perforación de Avance	Socavación	Perforación Radial para Socavación
	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Avance Horizontal
Carguío de Explosivos	Socavación	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales
	Desarrollos Horizontales	Carguío de Explosivos
	Apoyo	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria
LHD Preparación	Traspaso	Limpieza de Cámaras
	Desarrollos Horizontales	Limpieza de Pista
	Apoyo	Limpieza Pista
	Desarrollos Horizontales	Extracción de Marina
Perforación y Fortificación de Pernos	Desarrollos Horizontales	Perforación Perno-Cable
	Desarrollos Horizontales	Anclaje Perno-Cable
	Desarrollos Horizontales	Instalación y Fraguado de Perno-Cable
	Desarrollos Horizontales	Marcación de Pernos Split-Set
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Pernos Split-Set
	Desarrollos Horizontales	Instalación de Pernos Split-Set

\*Miembros AMTC: Javier Ruíz del Solar, Mauricio Mascaró, Mauricio Correa, Carlos Tampier, Isao Parra, Daniel Cardenas, Diego Carvajal y Miguel Campusano.

La automatización de las operaciones implica una modificación en el protocolo de trabajo existente. El sistema de operación manual, se basa en un control y supervisión total por parte del personal sobre el equipo y la operación unitaria realizada, por lo que el personal tiene que realizar las siguientes tareas:

- Chequeo del área de trabajo y de las variables operacionales presentes en el entorno.
- Supervisión del estado del personal y el equipo de trabajo.
- Transporte e instalación del equipo de trabajo en la zona de operación.
- Realización de la operación unitaria.
- Suministro de insumos requeridos en la operación.
- Desinstalación y retiro del equipo de la zona de trabajo.
- Chequeo del resultado de la operación.

La operación unitaria resulta siendo una parte del proceso completo que se lleva a cabo. La automatización de esta genera una modificación en la operación unitaria, pero de igual manera hay que realizar el resto de las tareas presentes en el proceso. Se genera una redistribución de las tareas y responsabilidades del personal (Figura 40), el cual ahora solo deberá realizar:

- La supervisión de las variables operacionales y de la zona de trabajo.
- La preparación, tarea que implica el transporte del equipo a la zona de trabajo, la aislación e instalación de éste para que pueda operar.
- Suministrar los insumos requeridos en la operación.
- La desinstalación, lo cual consiste en llevar a cabo el retiro del equipo de la zona de trabajo y el control de calidad del producto de la operación.

Esta redistribución de las tareas realizadas por el personal, generan una mejora inmediata en la seguridad de las operaciones ya que se evita que el personal sea expuesto directamente a la frente de trabajo y se genera una mejora en la productividad, ya que el personal puede diversificar sus tareas a distintas operaciones y supervisar una mayor cantidad de actividades. A partir de esto, se da a entender la necesidad del personal dentro de las operaciones autónomas, siendo que esta no significa el retiro total del personal de la mina, pero si un retiro de la zona de trabajo de mayor riesgo.

Este concepto de cambio operacional se aplica de manera general a la automatización de todas las operaciones, independiente de las diferencias específicas relacionadas a las labores de cada operación.

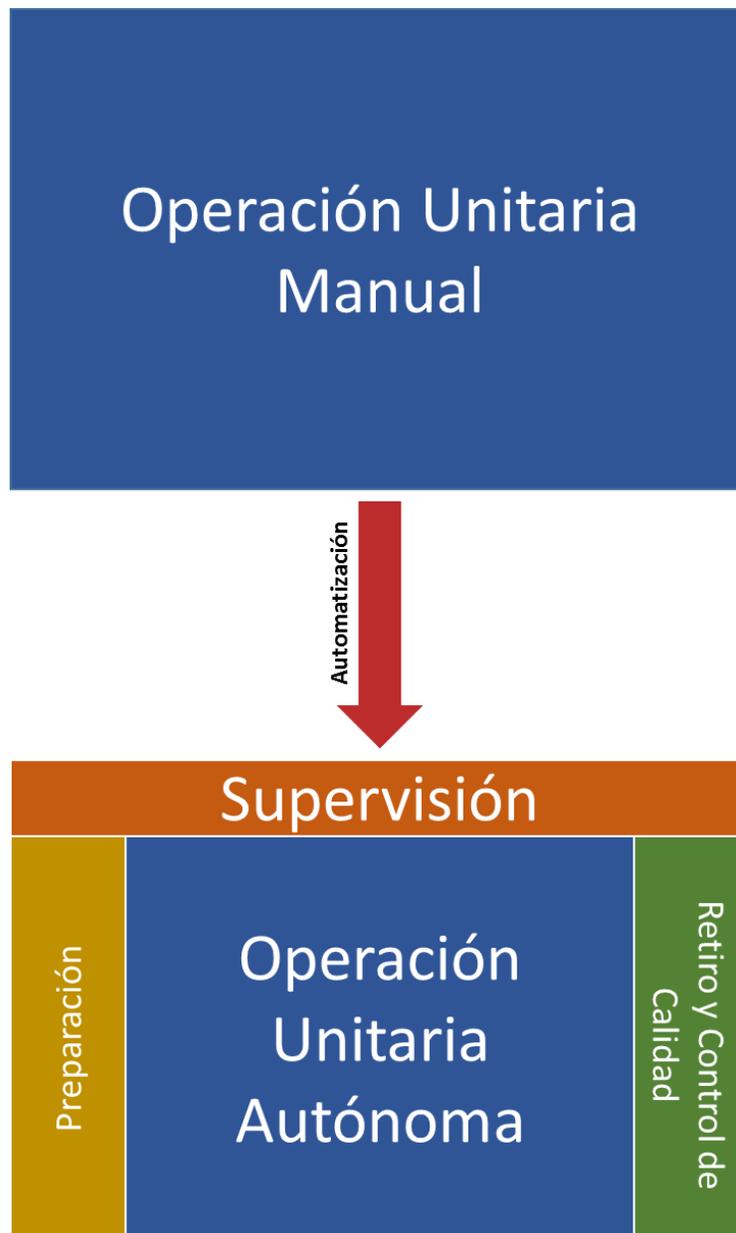


Figura 40: Redistribución de tareas en operación autónoma.

## 8.1 LHD Preparación

Las operaciones pertenecientes a la categoría de LHD Preparación, son todas aquellas que se realizan durante la etapa de preparación minera a través del uso del equipo LHD. Estas consisten en las siguientes operaciones:

- Limpieza de pista
- Limpieza de cámaras
- Extracción de marina

Se establecen bajo la misma categoría debido a que en la preparación minera se utiliza el mismo equipo LHD asignado a la extracción de marina para realizar las demás operaciones, por lo que si se automatiza este equipo es necesario evaluar todas las operaciones que se verán involucradas.

A continuación, se lleva a cabo una descripción en detalle de las operaciones realizadas:

### **Limpieza de Pista**

Producto de irregularidades en la pista de conducción, a causa de caída de mineral y desgaste de la misma, es necesario realizar una limpieza para disminuir el daño a los equipos que transitan en ella.

Se utiliza un equipo LHD destinado a la preparación minera, para realizar la operación.

El procedimiento de la operación es el siguiente:

- El jefe de nivel coordina y establece la ruta a limpiar.
- Se realiza un recorrido previo de la pista por el operador o por el jefe de nivel.
- Se procede a aislar la ruta a recorrer por el equipo mediante la utilización de cintas de confinamiento.
- El equipo LHD recorre la pista determinada con el balde a ras de piso, emparejando la pista y removiendo cualquier tipo de colpa o material presente.
- Finalizada la limpieza, se revisa la pista en busca de colpas o material restante.
- Por último, se retira el equipo y se habilita la zona.

### **Limpieza de Cámaras**

Producto de que el mineral es liberado en altura al momento del su traspaso por los equipos de carguío, parte de él no cae en la parrilla y se desploma en la zona que delimita la cámara de traspaso. Es por ello que se requiere recogerlo e introducirlo a la parrilla.

Se utiliza el mismo equipo LHD destinado a la preparación minera o equipos auxiliares (ej: *Bobcat*) para recoger el mineral e introducirlo a la cámara.

El procedimiento de la operación es el siguiente:

- Se confina la zona en donde se realizará la operación.
- El operador verifica el sector cercano a la cámara en busca de material remanente.
- Se procede a cargar ese mineral, para luego vaciarlo en el lugar establecido.
- Se realiza la operación hasta dejar limpia la cámara.
- Se habilita la zona y se retira el equipo.

### **Extracción de Marina**

Operación que consiste en trasladar el material tronado en la frente de avance a puntos de acopio, piques de traspaso o al chancador, mediante el uso de un equipo LHD.

La ruta de marina es designada previamente a la operación y los puntos de vaciado son establecidos en la programación del turno. La ruta debe ser delimitada completamente mediante el uso de cintas de confinamiento, en la cual se instala personal para comunicar al operador del equipo ante cualquier situación que se presente. El ingreso a la ruta solo puede ser autorizado por el operador del equipo LHD, el cual deberá detener el equipo, apagarlo y luego ir a la zona de ingreso y levantar la cinta de confinamiento.

El procedimiento de la operación es el mostrado a continuación y puede ser visto en detalle en la Figura 42:

- Se programa y coordina el momento de extracción de marina con los puntos de vaciado.
- El jefe de nivel revisa la ruta, puntos de extracción y vaciado verificando la concentración de gases, estado de la marina, la ruta y el pique de vaciado.
- El operador del LHD verifica la ruta y aísla la zona con cintas de confinamiento.
- El operador procede a realizar la extracción de la marina con el uso del equipo LHD.
- Terminada la extracción, el operador retira las cintas de confinamiento y el equipo, habilitando la ruta nuevamente.

En la Figura 41 se puede ver un equipo LHD Caterpillar de 7yd<sup>3</sup> utilizado en preparación minera.



*Figura 41: Equipo LHD Caterpillar R1600H.*

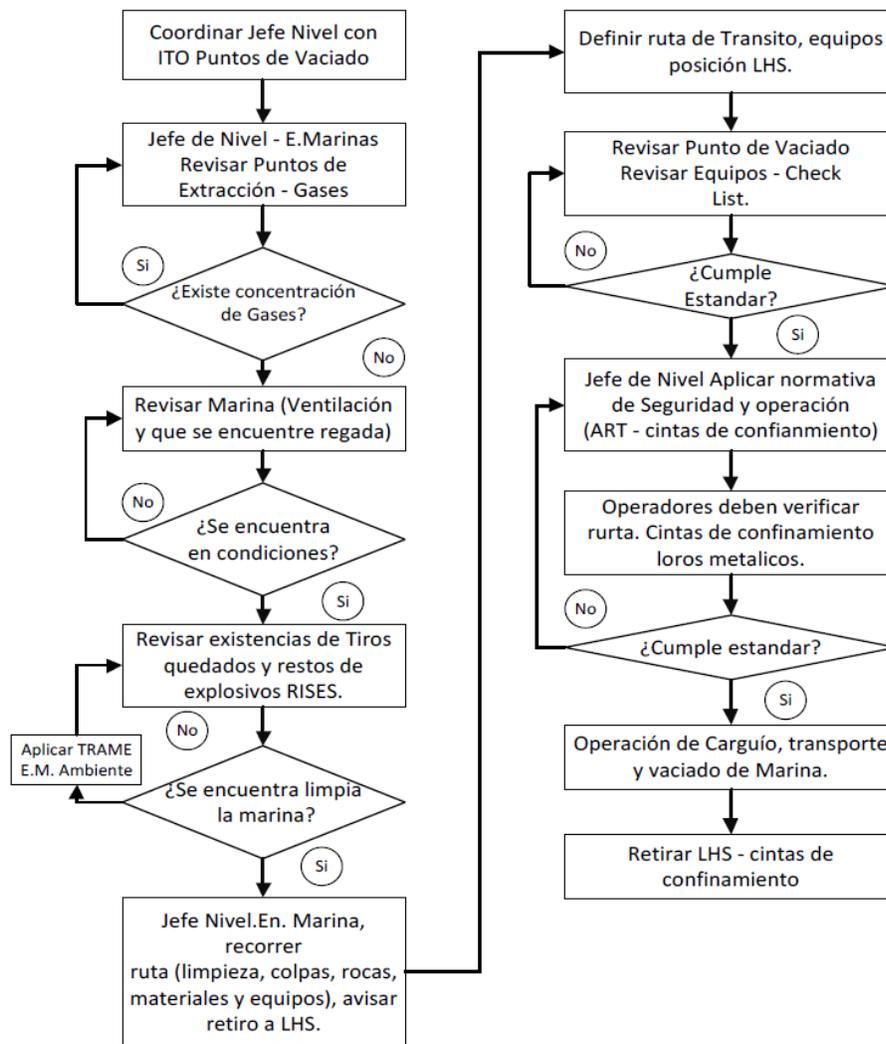


Figura 42: Protocolo de operación para la extracción de marina (Geovita, 2015).

Se puede ver que el uso del equipo LHD dentro de la preparación minera es variable y no tan intensivo como en la etapa de producción. Esto se debe a que en la preparación minera se trabaja a través de ciclos de operaciones, en la cual una operación tiene que terminar para poder iniciar la otra, por lo que se generan muchos tiempos muertos e interferencias entre operaciones.

La opción más viable es el desarrollo de una operación Telecomandada-Asistida. Se opta por esta opción en contra de la selección de la automatización total debido a la gran variabilidad e interacciones que se presentan en la operación a causa de los siguientes factores:

- Frente de carga variable, cambiando a medida se avanza en el desarrollo.
- Cambios constantes de la ruta de trabajo.
- Alto grado de interacción con el personal y otras operaciones.

Estos factores complican la automatización de la operación debido a que a partir de la tecnología actual y su proyección en el rango de años estimado, no se lograría desarrollar una tecnología que logre presentar el nivel de interoperabilidad\* requerido.

\*Interoperabilidad: Habilidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada para operar. (IEEE).

Mientras que la tecnología de LHD autónoma presenta una ganancia en la etapa de producción en la cual permite que un operador pueda controlar o supervisar de entre 3 a 5 equipos LHD´s a la vez (Carrasco, 2016) obteniendo así una ganancia significativa en utilización y productividad, para el caso de la preparación minera no se obtiene esta ganancia debido a la baja intensidad de uso y número de equipos LHD. Con la operación telecomandada-asistida se obtiene el mismo impacto en el aumento de la seguridad que la operación autónoma, pero con un mejor control y disposición de los recursos.

La operación telecomandada-asistida consiste en la utilización de un equipo LHD telecomandado, el cual tiene incorporado un sistema de asistencia que no permite que el operador colisione el equipo contra la infraestructura u otros equipos asistiéndolo en el transcurso del camino, permitiendo que el manejo del LHD se lleve a cabo de manera más efectiva y segura.

Este tipo de equipos cuentan con una serie de sistemas de sensores y controles los cuales permiten que realice la operación de manera telecomandada. Las operaciones telecomandadas presentan el mismo procedimiento para realizar la operación solo que con una serie de cambios, estos son los siguientes:

- El operador del equipo se encuentra en una estación de control ubicada al exterior de la zona de trabajo telecomandado o de la faena.
- Se requiere que el equipo LHD sea llevado a la zona de trabajo telecomandado de manera manual. Un operador de faena lleva al equipo a la zona de registro previamente establecida para que luego desde ese punto en adelante el equipo opere de manera telecomandada.
- Las operaciones de este tipo requieren de barreras de confinamiento más duras que las bandas de confinamiento utilizadas normalmente. Este tipo de barreras fueron descritas en la sección 3.2.14.
- Se requiere la instalación de una serie de redes y sensores (red de fibra óptica, *access point*, controladores de red) que permiten la operación del equipo. Estas fueron descritas en la sección 3.1.28.

Las variables influenciadas por el desarrollo e implementación de este tipo de tecnología son descritas a continuación.

## **Seguridad**

La principal ventaja que se obtiene al telecomandar o automatizar la operación es la ganancia en seguridad y ergonomía que presenta la operación (Marklund, 2017).

Se maximiza la seguridad del operador ya que al trabajar en una estación remota no estará expuesto a:

- Colisiones con infraestructura u otros equipos.
- Eventos de riesgo: Estallidos de roca, caída de roca, colapsos o incendios.
- Gases tóxicos y polvo con presencia de sílice u otros agentes.
- Ruidos y vibraciones que se presentan como resultado de operar un equipo de gran envergadura.

Esto permite evitar el posible desarrollo enfermedades profesionales, accidentes o fatalidades dentro de la operación. Al mismo tiempo se logra reducir en promedio un total de horas hombre trabajadas expuesta para el personal de la mina Debido a que en esta operación solo requiere que un operador transporte al equipo a la zona autónoma, se reduce a cero el tiempo en que el operador se encuentra expuesto a la frente activa de trabajo y se disminuye considerablemente el tiempo en que el operador está expuesto a los demás riesgos asociados con operar el equipo en la mina subterránea.

Cabe mencionar que este tipo de operación requiere de personal presente en la mina. Debido a que los equipos telecomandados y autónomos solo pueden circular dentro de las zonas de trabajo confinadas y predeterminadas para este tipo de operación, por lo que se requiere de personal que opere al equipo para llevarlo desde su ubicación actual hasta la zona de registro en donde comienza su trabajo telecomandado o autónomo. Pero este personal una vez transportado el equipo se puede retirar y continuar con sus distintas labores fuera de la zona de trabajo, por lo que la exposición del personal dentro de la operación del LHD es reducida al mínimo.

### **Disponibilidad Mecánica**

La disponibilidad mecánica del equipo LHD se considera mejorada al momento de telecomandar su operación. Esto se debe a que el sistema controlador del equipo le permite trabajar en su punto óptimo en base a los siguientes factores:

- El sistema mantiene un cambio de marcha eficiente, a las revoluciones adecuadas.
- Análisis en tiempo real y de manera continua del estado de los neumáticos.
- El sistema controla de manera automática las aceleraciones y velocidades, haciendo que estas sean lo más uniforme posible.
- Evaluación continua del estado y predicción del desgaste de las piezas del equipo.
- Manejo y detección de la temperatura del equipo durante la operación.
- Sistema de evasión permite evitar colisiones.

Todos estos factores que son controlados por el sistema de operación telecomandado-asistido permite aumentar la disponibilidad mecánica del equipo, disminuyendo la frecuencia de las mantenciones planificadas y no planificadas causadas por imprevistos de la operación (Carsson, 2005).

### **Utilización**

Al desarrollar la operación de manera telecomandada-asistida se genera un aumento en la utilización del equipo LHD, debido a mejoras en la administración de interferencias y disminución de pérdidas de tiempo operacionales. Esto se debe principalmente a los factores descritos a continuación:

- Administración de las interferencias de manera más precisa. Esto se debe a que la zona de trabajo remota permite ver y analizar toda la zona de trabajo de manera más detallada gracias a los sensores y cámaras presentes que permiten integrar de manera más eficaz la

información, a diferencia de la operación manual que es controlada de manera presencial por el personal.

- El periodo de tiempo entre el ingreso al turno y el inicio de la operación es menor debido a que el operador ya no necesitara ingresar a faena, ni realizar protocolos de seguridad y chequeos previos al desarrollo de la operación. Estos tiempos representan aproximadamente un 24% del tiempo total de la operación (Ccatamayo, 2017). Luego el ahorro de realizar estas actividades significaría un aumento significativo en la utilización del equipo.
- El equipo puede ser utilizado durante periodos de aislación (ej: tiempo de ventilación post-tronadura, aislación por sismicidad, etc.), ya que el operador trabaja desde una sala de control al exterior de la zona de operación. Esto genera que este tipo de eventos no presenten riesgo alguno para el operador del equipo, pudiendo aumentar así el tiempo de uso y seguridad del equipo y el operador.

## 8.2 Carguío de Explosivos

Operación que consiste en el carguío de explosivos en los tiros realizados en la perforación de avance de la frente o en el nivel de hundimiento para realizar la socavación. De acuerdo al diagrama de perforación se estima la cantidad de explosivos (ANFO o Emulsión) necesarios para realizar la tronadura. Para realizar la operación se requiere de una camioneta correctamente habilitada y certificada por el Sernageomin para el transporte de explosivos, de una grúa con jaula con techo protector y malla de seguridad, el equipo de carguío de explosivos y de personal certificado para la manipulación, carguío y transporte de explosivos.

El procedimiento que se realiza es el siguiente:

- Se distribuyen los cebos (primas) según secuencia de salida, en la boca de los tiros de arriba hacia abajo (a excepción de las zapateras que se cebarán y cargarán al final del proceso de carguío).
- Se introducirán los cebos en los tiros empleando un coligue (vara de madera o metal) del largo adecuado.
- Se procede al carguío de los tiros con el explosivo.
- Se instala un taco de cartón y barro en cada tiro.
- Finalmente se conectan los detonadores al cordón detonante.

Luego se aísla la zona y se retiran todos los equipos que pueden ser afectados por la tronadura.

En la Figura 43 se puede apreciar el protocolo estándar para realizar el carguío de explosivos.

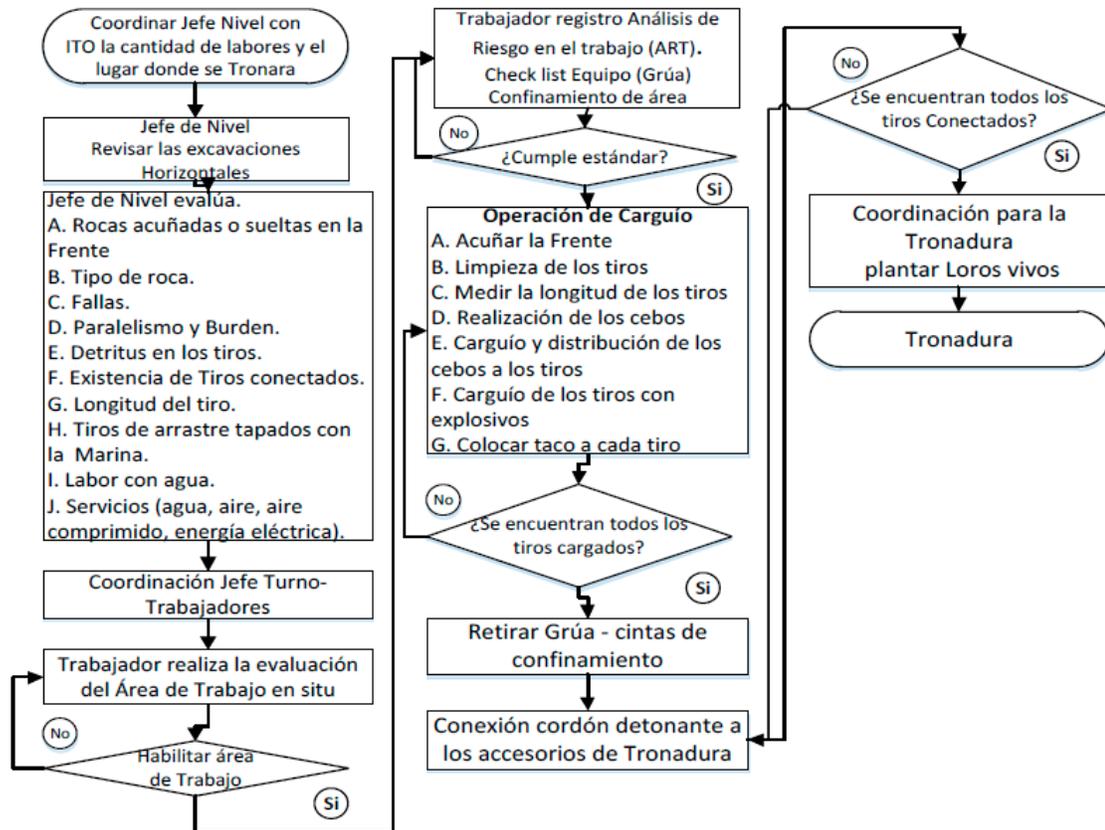


Figura 43: Protocolo de operación para el carguío de explosivos (Geovita, 2015).

La automatización de esta operación, consiste en desarrollar un equipo de carguío de explosivos que presente las siguientes características:

- Fábrica de explosivos móvil adherida al equipo de carguío.
- Equipo autónomo realiza la instalación de la prima, carga y amarre del explosivo.
- Equipo autónomo realiza la instalación de los detonadores.
- Utilización solo de explosivos del tipo emulsión.
- Equipo capaz de realizar la limpieza de los tiros.

El carguío de explosivos durante la preparación minera solo requiere de la aislación de la zona de trabajo, estableciendo un confinamiento cercano a la frente que está siendo cargada. Esto significa que no se aísla una ruta entera, ya que se debe permitir el tránsito de personal y equipos que se encuentran realizando otras operaciones. A causa de esto se decide desarrollar una operación de carguío autónomo en la cual:

- El equipo de carguío es transportado de manera manual a la frente de trabajo.
- El equipo es confinado de manera manual en la zona de operación, para luego comenzar con la operación autónoma.

Este tipo de operación permitiría tener la flexibilidad e interoperabilidad necesaria que requiere la preparación minera. A partir de esto se obtendrían los siguientes beneficios:

- Se obtiene una ganancia inmediata en seguridad reduciendo la exposición prolongada de una cuadrilla (4 a 6 personas) a una frente activa por una prolongada cantidad de tiempo.
- Se evita el manejo imprudente de explosivos.
- El sistema de carguío autónomo permite una carga eficiente de explosivos.

Se concluye que la principal ganancia del desarrollo de la tecnología autónoma es la seguridad. El carguío de explosivos es una de las operaciones más riesgosas que se realizan en la mina debido al grado de exposición a frentes activas, representando aproximadamente un 14% del ciclo total de la preparación minera (Camhi, 2012), como por el riesgo inherente que significa el manejo de explosivos y la automatización de la operación se presenta como una solución directa para resolver estos problemas.

### 8.3 Perforación y Fortificación de Pernos

La fortificación de pernos tiene como objetivo establecer un control de la estabilidad de los bloques y cuñas rocosas potencialmente inestable. Como método de fortificación brinda una buena relación costo-beneficio, facilidades de instalación y opciones versátiles de combinación con otros métodos (ej: malla, shotcrete). (Burgos, 2015)

Dependiendo de sus características, diseño y el modo en que interactúan con el macizo se puede clasificar los pernos según su tipo de anclaje con el macizo, estas categorías son mostradas en la Figura 44.

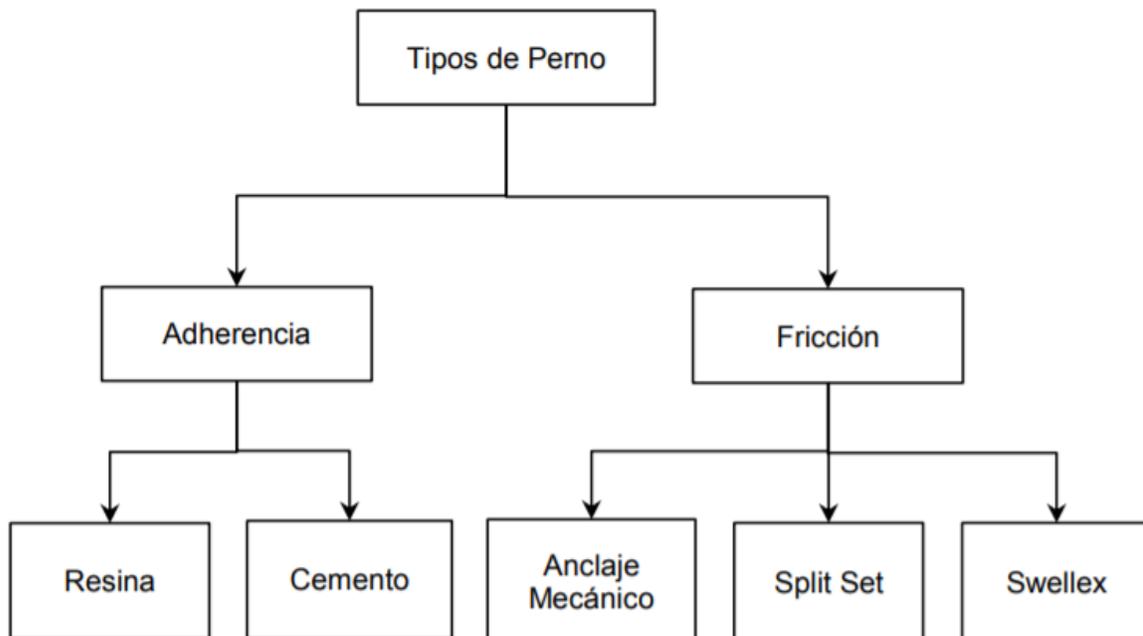


Figura 44: Clasificación de pernos (Vallejos, 2012).

Para el caso de estudio se evalúa la utilización de pernos instalados por adherencia con resina o cemento, específicamente del tipo Cable (Helicoidal) y de pernos instalados por fricción del tipo Split Set. Se evalúan este tipo de pernos debido a que son los más utilizados en el tipo de fortificación presente en las minas de Block y Panel caving en Chile.

### **Perno-Cable (Helicoidal)**

Barra helicoidal de 22mm de diámetro, con una longitud promedio de 2.4m. Posee una forma de rosca continua a lo largo de su longitud.

Son bastantes usados por su simplicidad y bajo costo. Su funcionamiento se basa en el contacto entre el perno y las paredes de la perforación dado por lechadas de cemento o resinas inyectadas a lo largo de esta. La utilización de lechada de cemento o resina es una decisión económica siendo la resina la que presenta un costo mayor. Por lo general este tipo de perno se utiliza como fortificación de tipo permanente. En la Figura 45 se puede apreciar una ilustración de este tipo de pernos.

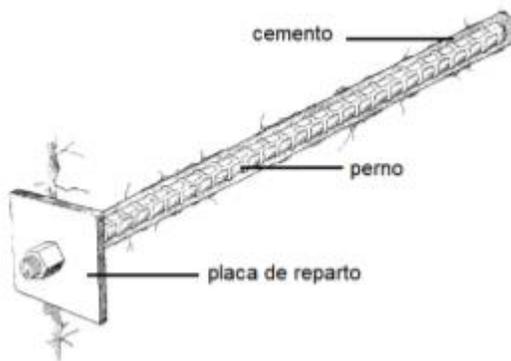


Figura 45: Perno adherido por cemento (Burgos, 2015).

### ***Split Set***

Tubo ranurado a lo largo de su longitud, uno de los extremos es ahusado y el otro lleva un anillo soldado, con diámetro promedio de 35mm y longitud de 2mt.

La interacción entre el macizo y el perno se realiza creando una fuerza de fricción entre la superficie de este y la pared de la perforación, tomando carga de manera inmediata después de su instalación. Posee un bajo costo y una gran simplicidad para su instalación, se introduce mediante percusión generando una compresión en el tubo, dando lugar así a la fricción que ancla al perno a la perforación.

Son utilizados principalmente como refuerzo temporal, conformando principalmente sistemas combinados de refuerzo. En la Figura 46 se puede apreciar una ilustración de este tipo de pernos.

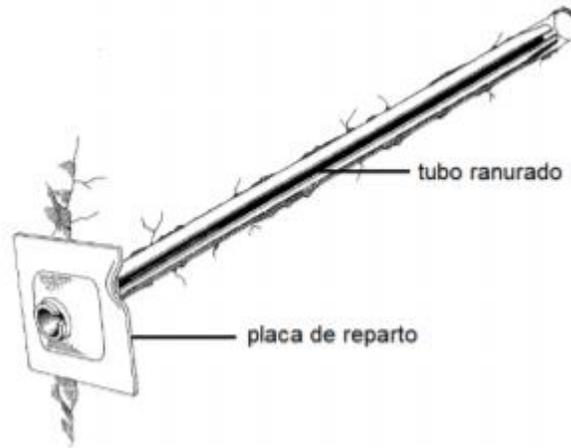


Figura 46: Perno Split Set (Burgos, 2015).

El procedimiento a realizar en esta operación se divide de la siguiente forma:

### **Perforación e instalación de pernos Helicoidales y Split Set**

La perforación para la instalación de pernos se realiza en la dirección de avance de las labores de desarrollo. Se utiliza un equipo Jumbo apernador, designado para la perforación y fortificación de pernos, el cual puede perforar, instalar los pernos y el tipo de resina a utilizar. El equipo se compone por el operador del Jumbo y un ayudante.

El procedimiento a realizar es el siguiente:

- Se instala el equipo Jumbo en la frente, la cual luego es aislada.
- Se conecta el equipo Jumbo a las redes de electricidad y agua.
- Se inicia la perforación según el diseño de la malla de fortificación.
- Luego el ayudante procede a la colocación de los pernos Split Set al Jumbo, el cual los inserta en las perforaciones designadas para ellos.
- Posterior a la instalación de los pernos Split Set se retira el equipo de la frente.

En la Figura 47 se puede apreciar el protocolo estándar para realizar la perforación e instalación de pernos.

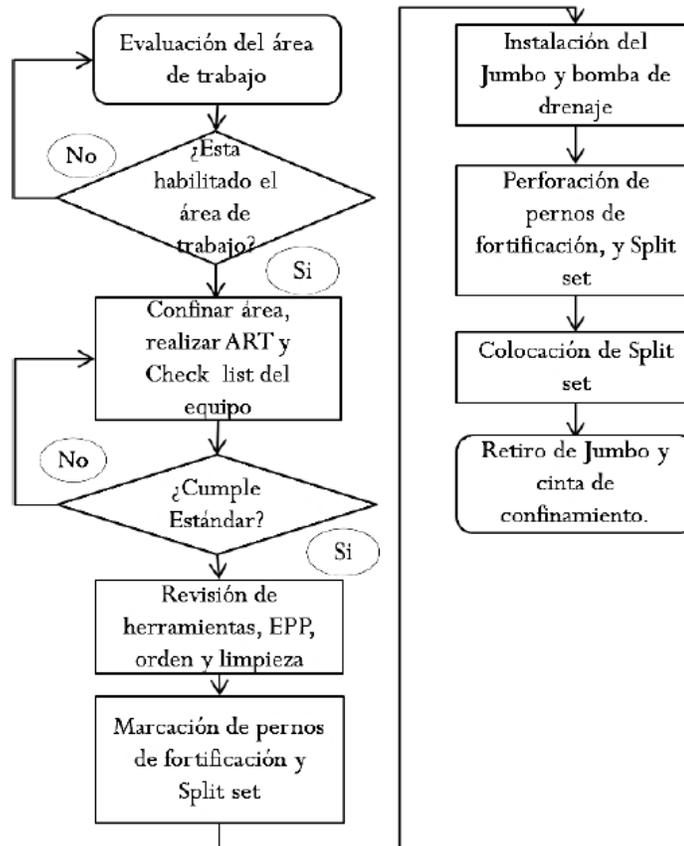


Figura 47: Protocolo de operación para la perforación de pernos helicoidales y Split Set (Geovita, 2015).

## Lechada de pernos

Actividad que consiste en instalar los pernos helicoidales los cuales son adheridos a la pared mediante el uso de lechada de cemento en los tiros perforados. Para ejecutar esta actividad se usa grúa con jaula dotada de techo protector y una máquina encargada de inyectar la lechada la cual cuenta con mangueras de alta presión y largo adecuado.

El procedimiento a realizar es el siguiente:

- Se ingresa la grúa y los materiales necesarios.
- Se procede a la inyección de lechada de manera manual en las perforaciones mediante el uso de la grúa y la manguera de lechada.
- Terminada la inyección se procede a la instalación de los pernos con la utilización del equipo jumbo.
- Finalmente, se retiran los equipos y se deja la zona confinada por un tiempo promedio de 2 horas para permitir fraguar la lechada.

En la Figura 48 se puede ver el protocolo de operación estándar para la operación de lechada de pernos.

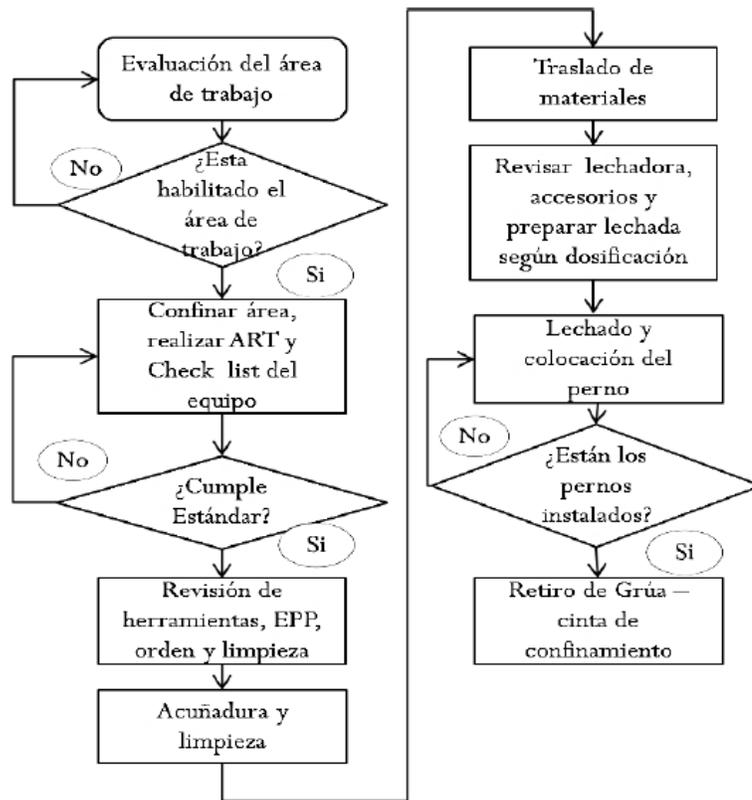


Figura 48: Protocolo de operación para la lechada de pernos (Geovita, 2015).

### Instalación de Pernos con Resina

En caso de que en la operación se utilicen pernos helicoidales aplicados con resina, el procedimiento varía al de los instalados con lechada de cemento. En este caso se utiliza un equipo Jumbo el cual está diseñado para realizar la perforación y al mismo tiempo estar equipado de los pernos y los cartuchos de resina necesarios.

El procedimiento a realizar es el siguiente:

- Se instala el equipo en la frente, la cual luego es aislada.
- Se conecta el equipo Jumbo a las redes de electricidad y agua.
- Se inicia la perforación según el diseño de la malla de fortificación.
- Luego el ayudante procede a la colocación de los pernos Split Set al jumbo, el cual los inserta en las perforaciones designadas para ellos.
- Posterior a la instalación de los pernos Split Set se retira el equipo de la frente.
- Se cambia la configuración del equipo para instalar los cartuchos de resina.
- El Jumbo procede a insertar los cartuchos de resina en las perforaciones respectivas.
- Se cambia la configuración del equipo para la instalación de pernos helicoidales.
- Se procede a instalar los pernos helicoidales en las perforaciones, mezclándose así con la resina.
- Finalizada la instalación de los pernos, se retiran las conexiones a las redes de insumos y se retira el equipo de la frente.

En la Figura 49 se puede apreciar un equipo Jumbo apernador y que cuenta con un sistema de instalación de malla.



*Figura 49: Jumbo apernador Epiroc Boltec M.*

La automatización de esta operación tiene que afrontar los siguientes factores operacionales para su realización:

- La frente de trabajo va cambiando de posición a medida avanza la galería y existe la posibilidad de trabajar en múltiples frentes.
- Se genera una alta interacción con otros equipos y personal.
- El equipo requiere ser aislado en una zona específica de trabajo la cual no consiste en la aislación de la ruta para llegar a la zona de trabajo.
- El equipo requiere conectarse a las redes eléctricas e hídricas las cuales van variando de posición con el avance de la galería.
- El equipo tiene que ser capaz de llevar almacenados los aceros de perforación, pernos y la resina o lechada.

Estos factores operacionales demandan que el equipo autónomo pueda interactuar en gran medida con su entorno, entregando un nivel máximo de seguridad. También, se requiere que el equipo sea capaz de realizar la conexión a redes y aislación de manera independiente. El estado actual de la tecnología autónoma y la proyección del desarrollo de ésta en el corto-mediano plazo no permite que el equipo pueda cumplir con estas condiciones operacionales, principalmente por que la gran variabilidad de la operación y el alto grado de seguridad requerido no pueden ser alcanzados en ese lapso de tiempo.

Se establece que para lograr un óptimo y una compatibilidad operacional las siguientes actividades se deben realizar de manera manual:

- Transporte del equipo a la frente.
- Aislación de la zona de trabajo.
- Conexión a las redes hídricas y eléctricas.

Esto permitirá un fácil transporte, conexión y aislación del equipo evitando cualquier riesgo en la interacción del equipo autónomo con el personal en una zona no aislada durante el tránsito de este, dando una mayor seguridad a la operación. La operación requiere que el equipo utilice resina como medio de acople para los pernos, ya que esta puede ser transportada en cartuchos dentro del equipo al contrario de la lechada la cual requiere de un equipo secundario.

Una vez aislado y conectado, el equipo procede con la operación autónoma realizando la perforación e instalación de los pernos. La operación autónoma presenta las siguientes ventajas:

- Máxima seguridad, ya que el personal no estará expuesto a la frente activa de trabajo.
- Mejora en la utilización de recursos ya que el sistema es controlado de manera continua por el sistema autónomo.
- Mejora en la calidad de las perforaciones, debido al control continuo de los diversos factores de perforación por el sistema autónomo.
- Disminución del desgaste del equipo (motor, sistema hidráulico y eléctrico) debido al control continuo del estado del equipo y sus piezas por parte del sistema autónomo. Esto permitiría disminuir el número de fallas y mantenciones necesarias.
- Disminuye la cantidad de personal necesario para la operación, ya que solo se necesita de un operador que lleve al equipo a la frente y lo conecte.

La perforación y fortificación de pernos equivale en promedio al 21% del tiempo involucrado en la preparación minera (Camhi, 2012) siendo una de las operaciones principales ya que implica la fortificación y sostenimiento de la galería. También es una de las operaciones que presenta los mayores costos operacionales dentro de la preparación minera y una de las más riesgosas debido al alto grado de exposición al riesgo inherente de una frente activa por una cantidad prolongada de tiempo. La automatización permitiría mejorar de manera inmediata la seguridad de la operación, una mejora en el consumo de insumos y optimización de la calidad del producto final.

## **8.4 Perforación de Avance**

Tarea que consiste en la perforación del diagrama de disparos horizontales para la construcción de túneles. Para la realización de la operación se utiliza un equipo de perforación horizontal Jumbo, el cual puede tener de 1 a 4 brazos de perforación, dependiendo de los requerimientos de la faena.

El equipo de trabajo consiste en un operador del equipo Jumbo y un electromecánico. En la Figura 51 se puede apreciar un equipo Jumbo de dos brazos utilizado para realizar las perforaciones de avance horizontal.

El procedimiento que se realiza es el siguiente:

- El equipo es llevado a la frente de trabajo para luego confinar el sector mediante el uso de cintas de confinamiento.
- El electromecánico habilita la conexión del jumbo a las redes de energía eléctrica, tendiendo el cable del equipo al punto de energía y realizando la conexión. También se procede con la conexión del equipo a la red hídrica de la mina.
- En el frente, el jumbo se posiciona utilizando gatos estabilizadores. Luego se procede a instalar la bomba de drenaje.
- Instalado el equipo y la bomba, se procede a la perforación de la frente.
- Finalizada la perforación se recoge en forma mecanizada el cable de alimentación eléctrica del jumbo.

En la Figura 50 se puede ver el protocolo de operación estándar para esta operación.

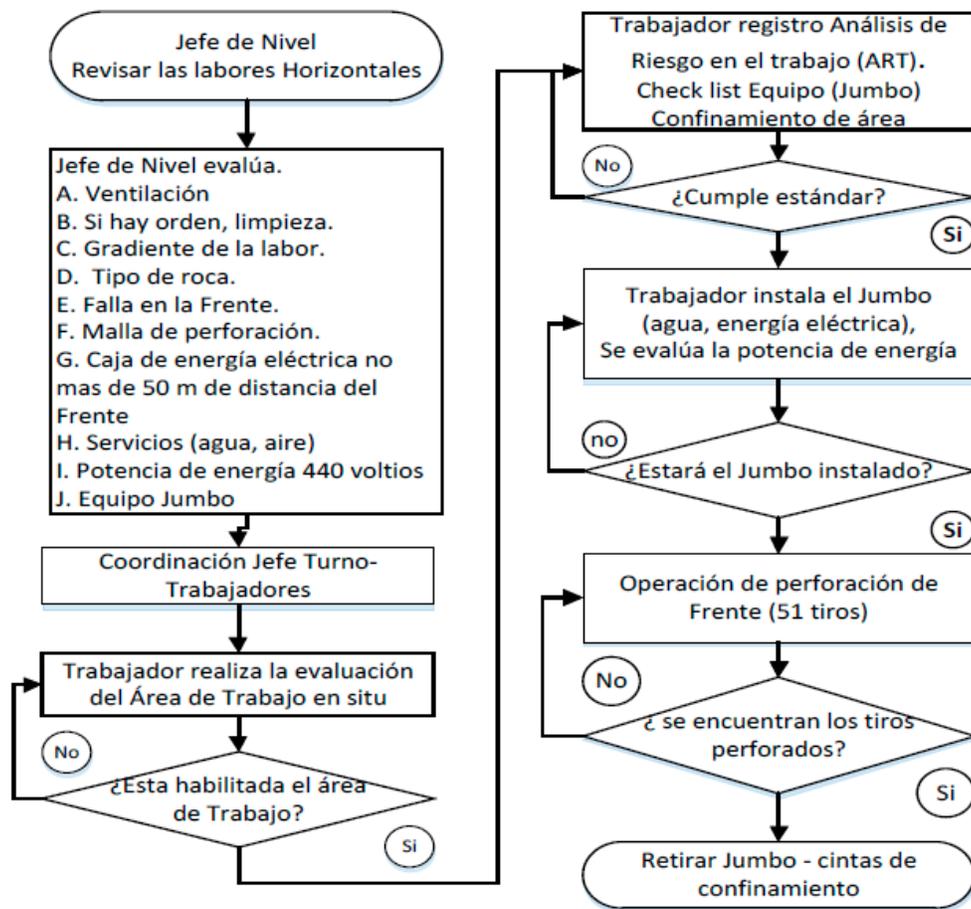


Figura 50: Protocolo de operación para la perforación de avance horizontal (Geovita, 2015).



*Figura 51: Equipo de perforación jumbo Epiroc Boomer E.*

La automatización de esta operación se ve afectada por los mismos factores operacionales que la perforación y fortificación de pernos. Debido a esto, se establece de igual manera que la operación autónoma tiene que empezar después de que el equipo sea transportado, aislado en la frente de trabajo y conectado a las redes eléctricas e hídricas.

La automatización de esta operación permitiría obtener los siguientes beneficios:

- Se maximiza la seguridad ya que se retira al personal de la frente activa de trabajo.
- Se mejora el consumo de insumos debido al control del sistema autónomo.
- Se disminuye el desgaste del equipo debido a que el sistema autónomo controla de manera continua las variables operacionales para no sobrepasar los límites del equipo. Esto permite disminuir el número de mantenciones necesarias y las fallas generadas.
- Reducción del personal necesario para la operación. Solo se requiere de un operador que transporte, aisle y conecte el equipo en la frente.
- Mejora en la calidad de las perforaciones, debido al control continuo de los diversos factores de perforación por el sistema autónomo.

La operación de perforación de avance representa el 21% del tiempo involucrado en la preparación minera (Camhi, 2012), por lo que la mejora de esta tendría un impacto significativo en la operación. La perforación de avance es catalogada como una de las operaciones con el mayor grado de exposición del personal al riesgo debido al prologando tiempo que se encuentra el personal expuesto a una frente activa y una de las que presenta los mayores costos operacionales. La automatización se presenta como una solución gran solución, entregando una mejora inmediata en la seguridad y calidad de la perforación.

## **8.5 Análisis de Automatización de Ciclo Operacional**

Las operaciones mineras se realizan a través de ciclos operacionales en los cuales se relacionan un diverso número de operaciones unitarias. La automatización de una de estas operaciones tiene un impacto directo sobre el ciclo, ya que se requiere modificar la infraestructura de la mina y realizar cambios en los protocolos operacionales, a causa de esto es necesario evaluar la automatización de más de una de las operaciones pertenecientes al ciclo o la automatización del ciclo en su totalidad

para poder ver los posibles beneficios a obtener del desarrollo e implementación de la tecnología autónoma.

Como se mencionó anteriormente, la automatización de una operación modifica directamente la operación unitaria que realiza el equipo, para que esta sea llevada a cabo de manera independiente del personal humano, al cual se redistribuyeron sus tareas a realizar dentro de la operación. Al mismo tiempo, analizando el ciclo minero en el caso que solo se automatizara una operación unitaria la ganancia en productividad no sería significativa ya que se tendría aproximadamente el mismo número de personas involucradas en la operación, pero de distinta manera y al mismo tiempo se tendría una interacción entre operaciones manuales contiguas a la operación autónoma lo cual puede entorpecer el ciclo debido a las interferencias que se generarían.

Evaluando el caso en que dos o más de las operaciones pertenecientes a un mismo ciclo de trabajo puedan ser automatizadas, como el mostrado en las secciones anteriores en donde todas las operaciones que presentan una oportunidad de automatización pertenecen al mismo ciclo de preparación minera y se realizan de manera secuencial, la automatización de estas operaciones implica que el personal relacionado a cada operación tenga que realizar las tareas de transporte, aislación, instalación, supervisión y desinstalación del equipo, todo de manera individual con respecto a las demás operaciones.

Una alternativa a esto, es que al tener una serie de operaciones automatizadas que se realizan en secuencia, solo sea necesario el trabajo de un único equipo de personas las cuales estén encargados de todas las tareas de (Figura 52):

- Transporte del equipo autónomo a la zona de trabajo.
- Aislación de la zona autónoma.
- Instalación del equipo autónomo en la frente.
- Supervisión de la operación.
- Suministro de insumos.
- Desinstalación del equipo autónomo.
- Retiro del equipo autónomo de la frente de trabajo.

Esta metodología de trabajo es comparable con las operaciones de LHD semi-autonomos en las cuales un operador es capaz de operar y supervisar más de un equipo a la vez (Carrasco, 2016), por lo que se obtienen los siguientes beneficios:

- Productividad: Se genera un aumento en la productividad de la operación, ya que se reduciría el número de personas necesarias por operación. Esto, a causa de que solo se requeriría de un equipo de trabajo para supervisar dos o más operaciones.
- Seguridad: El aumento en la seguridad es inmediato, ya que se reduce el número de personal presente en la mina y este no es expuesto a las frentes de trabajo activas.
- Utilización: Se aumenta la utilización de los equipos ya que no se generaría una interferencia entre las operaciones ya que se eliminaría la realización de las tareas manuales entre ellas, dejando a que se trabaje de manera continua dentro de la zona autónoma.

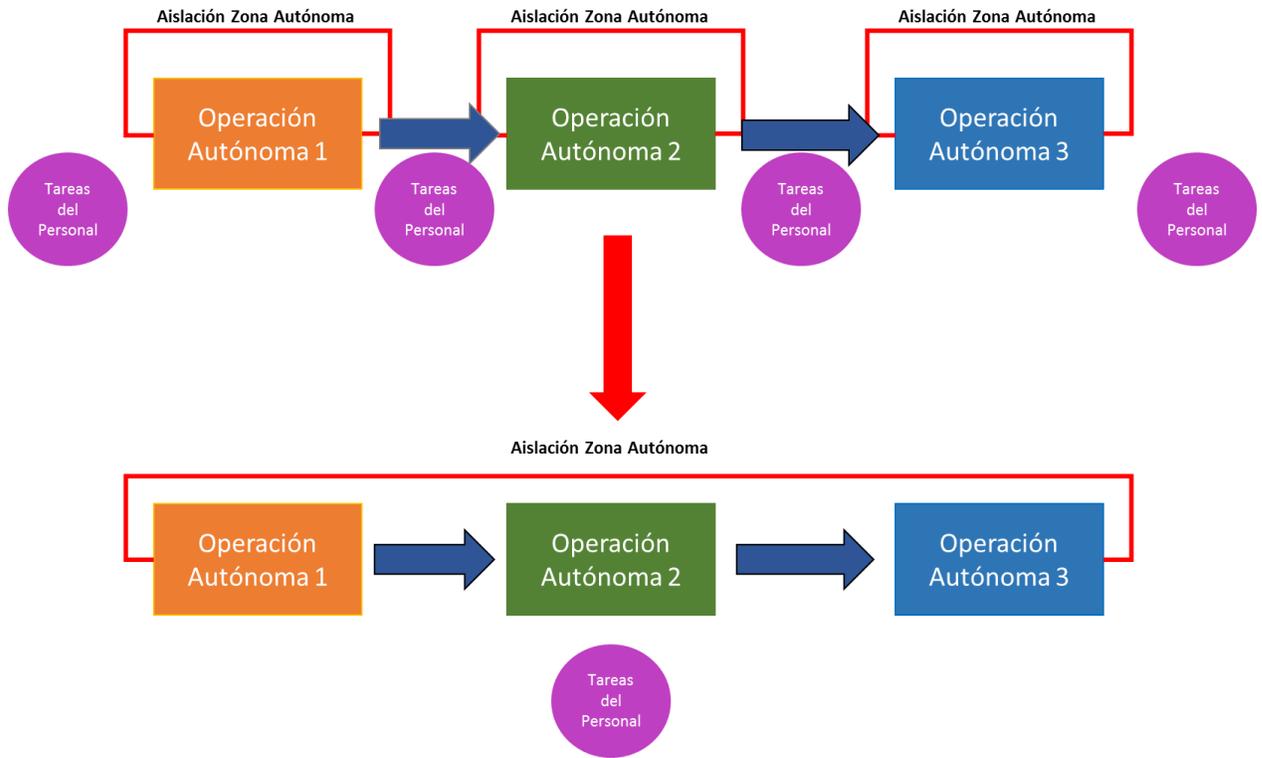


Figura 52: Ejemplo de automatización de ciclo minero.

## **9. Oportunidades de Automatización de Actividades Secundarias**

Existe una serie de operaciones en la mina que no son realizadas de manera continua en la operación debido a que no pertenecen a los ciclos de preparación o producción, pero que presentan un alto nivel de riesgo para el personal que los realiza y tienen un cierto grado de significancia en la operación.

La exposición al riesgo del personal puede ser evitado mediante la automatización de estas operaciones, entregando una solución al problema de seguridad que presentan. Al mismo tiempo, en algunos casos, la automatización de estas puede llegar a aumentar la efectividad con la que se realiza la actividad.

### **9.1 Sensado de Condiciones al Interior Mina**

Actualmente en la minería subterránea de Block y Panel Caving se están implementando sensores que permiten analizar de manera continua la sismicidad presente en la operación (geófonos) y sensores para el control de ingreso/salida del personal y equipos (sistema TAG).

Existe una serie de factores los cuales pueden ser analizados a través del uso de sensores los cuales no se han aplicado en faena de manera masiva en la actualidad.

#### **9.1.1 Control de Gases**

La verificación de la concentración de los gases tóxicos generados en la tronadura de la frente se realiza de manera manual, a través del uso de detectores de gases portátiles, los cuales son usados por el personal en la frente de trabajo. Esto genera una exposición directa del personal a los gases lo cual puede ser perjudicial para la salud, exponiendo al personal a situaciones de envenenamiento o sofocamiento a causa de concentraciones excesivas.

La automatización del sistema de detección y alerta de gases se basa en el uso de sensores inalámbricos, que a través del uso de redes WSN (wireless sensor network), permiten un análisis continuo y en tiempo real de la concentración de gases mediante un módulo de muestreo y captura al interior mina (Echeverri, 2012).

El uso de sensores autónomos requiere de una red y una sala de control, lo cual hace que la operación sea menos flexible que la operación manual, ya que la operación manual permite evaluar la concentración de gases sin la necesidad de instalar la red de sensores. Actualmente, este tipo de sistemas se emplea ampliamente en la minería del carbón, en donde ha demostrado la entrega de beneficios de seguridad, monitoreo en tiempo real y el control de un área mayor que la que entregan los sensores manuales (Salamanca, 2014), por lo que la implementación de este sistema traería grandes beneficios a las operaciones mineras de block y panel caving.

En la Figura 53 se puede ver un prototipo de sensor de gases inalámbrico.



Figura 53: Sensor de gases inalámbrico (Salamanca, 2014)

### 9.1.2 Control de Humedad y Eventos de Agua Barro

El fenómeno de agua-barro es un evento que se da en minas de Block y Panel Caving, principalmente en los puntos de extracción, el cual se define como una mezcla de material de granulometría fina con agua, que al presentarse simultáneamente generan un bombeo de material al verse afectado por la interacción entre los equipos y el flujo de material en el punto de extracción. Las únicas variables operacionales, demostradas hasta la fecha, que están relacionadas directamente con estos eventos son la uniformidad de tiraje [%] y la velocidad de extracción [ $t/m^2/día$ ] (Soto, 2018). En la Figura 54 se puede ver un ejemplo de un evento de agua barro generado en una mina subterránea.



Figura 54: Situación de agua barro en mina Premier, Sudáfrica (Jakubec, et al., 2013)

En base a estudios, se ha establecido que el riesgo de que ocurra un evento de agua barro aumenta el doble cuando el material pasa de un estado húmedo a mojado (contenido volumétrico de agua superior al 10%) (Pérez, 2017). En la Figura 55 se muestran los niveles de riesgo asociados a las distintas combinaciones entre humedad del mineral y su granulometría para eventos de agua barro.

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% < G(x) < 50%	50% < G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad Cualitativa	H0: Seco	Green	Green	Green	Green
	H1: Levemente Húmedo	Green	Green	Green	Yellow
	H2: Húmedo	Green	Green	Yellow	Red
	H3: Barro Incipiente	Green	Yellow	Red	Red
	H4: Barro	Yellow	Red	Red	Red
	A: Agua	Green	Green	Yellow	Red

Leyenda	Comentario	
Green	Normal	Humedad y granulometría favorable para la continuidad operacional.
Yellow	Observación	Observación de la evolución de humedad y granulometría.
Red	Alerta	Alerta por la condición de humedad y granulometría.

Figura 55: Matriz de peligro de bombeo de barro en puntos de extracción, Mina El Teniente (Pérez, 2017).

Los eventos de agua barro presentan un gran riesgo a la operación ya que son eventos súbitos que pueden generar heridas, accidentes fatales, daño a la infraestructura y equipos, altos porcentajes de dilución en los puntos de extracción, retrasos en los programas de producción, y en casos más extremos el cierre definitivo de la mina (Jakubec, et al., 2013).

En la actualidad, cuando se detecta previamente o sucede un evento de agua barro se procede a aislar la zona y detener la extracción de los puntos de extracción ubicados en el área afectada. Una vez aislada la zona, se procede a drenar el agua-barro para luego limpiar y habilitar la zona nuevamente, todo esto realizado de manera manual. Una vez habilitada la zona se continúa la extracción de manera controlada y bajo una revisión constante, pero solo de los puntos contiguos al punto de extracción, los cuales son denominados “puntos limitados”.

Si los puntos limitados presentan nuevas situaciones de agua barro, hasta el punto que el número de puntos afectados involucra un área mayor, se clausura el área. Se procede a habilitar nuevamente el área afectada y se deja operativa para la operación de equipos LHD telecomandados, debido a se puede operar este tipo de equipos sin que el personal este expuesto a algún riesgo de este tipo de eventos.

Las situaciones de agua barro son controladas de manera posterior con el uso de equipos telecomandados o autónomos, lo cual significa un alto grado de pérdidas operacionales previas y de exposición al riesgo del personal. Los siguientes factores son base de estudio para lograr prevenir que sucedan accidentes a causa de eventos de agua barro:

- Monitoreo del material: Monitoreo continuo de la humedad y granulometría que presenta el mineral.

- Monitoreo del cráter de subsidencia: Monitoreo en búsqueda de nuevas fallas, acumulación de aguas y perfiles de elevación de la topografía.
- Monitoreo geotécnico: monitoreo de cambios o deformaciones en la topografía de las galerías a causa de nuevos esfuerzos.

Todos estos factores son actualmente monitoreados de manera manual, pero tienen la capacidad de ser monitoreados de manera telecomandada o autónoma, al igual que el uso de equipos LHD autónomos para llevar a cabo la extracción del material. La automatización de estas operaciones permitiría una extracción y monitoreo continuo dándole así una mayor seguridad y continuidad a la operación.

Actualmente un experto está encargado de realizar la medición de manera manual en el punto de extracción. Esto genera una serie de problemas y pérdidas a la operación, primero se expone a un riesgo inherente al experto que se debe acercar a un punto de extracción activo en una zona de trabajo industrial, también el hecho que sea una medición manual genera un sesgo en los resultados ya que dependerá del criterio y la evaluación que haga el experto el resultado del análisis. Por último, debido a que una persona debe ir al punto de extracción, éste debe ser aislado, por lo que queda inutilizado durante el tiempo que se realiza la medición afectando de manera negativa la productividad e interfiriendo con la operación.

La utilización de sensores, los cuales consisten en un par de antenas que pueden ser instaladas en los marcos a la entrada del punto de extracción de manera mecánica (ej: apernadas), permiten entregar un estado en tiempo real del nivel de humedad presente en el punto, dando una mayor flexibilidad a la operación, mejor estimación de los datos y un mayor control de la operación, generando una mayor probabilidad de evitar situaciones de agua barro (Casafont, 2017).

## **9.2 Inspección de Galerías Abandonadas**

A medida que crecen las columnas de hundimiento y se va profundizando la mina, ciertos niveles superiores son abandonados debido a que ya cumplieron su uso o debido a la estabilidad de la roca ya no es seguro operar en esa zona.

Debido a que por lo general estas galerías se encuentran en los niveles superiores, cerca de la subsidencia, hay veces en se envía una cuadrilla a inspeccionar estas galerías para dar un estimado del estado del hundimiento.

Otra situación en la que se va a inspeccionar este tipo de galerías, es en caso de que suceda algún inconveniente en la operación y se inspecciona este tipo de galerías para evaluar una posible reapertura de la operación en esa zona de modo de contingencia para cumplir con el plan de producción.

Este tipo de inspección significa un gran riesgo para el personal que la realiza, ya que se exponen a galerías con baja fortificación debido a la falta de mantenimiento y los esfuerzos a las que son sometidas, falta de oxígeno y concentración de gases a causa del corte de la ventilación a esa zona que ya no se encuentra en uso y posibles eventos extremos como lo son colapso o estallidos de roca. Debido a esto, la automatización o el uso de equipos telecomandados (ej: drones) para realizar esta operación es una solución factible, que facilitaría la inspección y disminuiría considerablemente el nivel de exposición de la operación.

### **9.3 Chequeo de Puntos de Extracción**

Las rutas y puntos de extracción que son utilizados por los equipos LHD para realizar la extracción del material tienen que ser chequeados de manera previa a llevar a cabo la operación por el operador del equipo o por el jefe de nivel.

Esto se hace para determinar el estado de la pista en busca de colpas o irregularidades que perjudiquen la operación, el nivel de humedad presente en la roca, ley y granulometría que presenta el mineral de los puntos de extracción determinados. Debido a que esta actividad se realiza de manera manual y sin el uso del equipo LHD, se expone al personal que lo hace a los riesgos inherentes presentes en la faena.

La automatización de estas actividades, como por ejemplo, el monitoreo del estado de la ruta mediante el uso de drones o cámaras, la determinación de la humedad o el estado del punto de extracción a través del uso de sensores, traería grandes beneficios a la operación. Permitiría realizar la tarea de manera segura y efectiva, realizando un monitoreo continuo y el operador ahorraría una cantidad de tiempo significativa aumentando así la utilización del equipo.

## 10. Conclusiones

### **Análisis y Categorización de Operaciones**

Para realizar un levantamiento de las oportunidades de automatización en la mina se llevó a cabo un levantamiento y desglose del total de operaciones involucradas en las etapas de preparación minera y operación mina, en conjunto con las actividades auxiliares relacionadas a esas etapas. Obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se identificó un total de 58 operaciones: 16 de operación mina, 30 de preparación minera y 12 actividades auxiliares.
- Las operaciones pertenecientes a la preparación minera incluyen todas las operaciones necesarias para desarrollar en su totalidad las galerías, desarrollos verticales e instalación de infraestructura y redes en la mina. Esto permite evaluar una mayor cantidad de operaciones que las evaluadas en los ciclos tradicionales de preparación minera.
- Las operaciones pertenecientes a operación mina son las involucradas desde la socavación del mineral hasta su extracción al exterior mina. Las actividades auxiliares incluyen las operaciones de apoyo, mantenimiento y abastecimiento de los equipos e infraestructura en la mina.

### **Análisis de Desarrollo e Implementación de Tecnología Autónoma**

El primer criterio a evaluar en busca de oportunidades de automatización de las operaciones fue el esfuerzo o tiempo necesario para desarrollar e implementar la tecnología autónoma requerida para cada operación. Esto entrega un criterio importante al momento de la selección, ya que las oportunidades que requieran una menor cantidad de tiempo son más factibles para automatizar obteniendo los beneficios de la automatización de una manera más inmediata. Al mismo tiempo, entrega una evaluación importante de las operaciones que no pueden ser automatizadas en el corto o mediano plazo siendo estas descartadas en un principio como oportunidad para automatizar.

La estimación realizada consideró una serie de supuestos operacionales y de mercado para poder generar un escenario realista en cuanto al desarrollo de la tecnología y su implementación. Se evaluaron todas las características de las operaciones considerando su estado actual de automatización, interacción con el medio y el personal, insumos requeridos y el tipo de operación que realiza el equipo a automatizar.

En base a esto se logró estimar que:

- En un rango de 0 a 4 años es posible telecomandar un 43% y automatizar un 17% de las operaciones presentes en la mina actualmente.
- Para un rango de entre 4 a 6 años es posible telecomandar un 21% y automatizar un 52%.
- Por último, se tiene que no es posible automatizar ninguna de las operaciones restantes en un período de tiempo menor a 6 años, debido a la complejidad y variabilidad de las tareas que realizan, como por ejemplo la instalación de infraestructura o conexiones de redes dentro de la mina.

A partir de esto se puede concluir que las operaciones pertenecientes a la etapa de operación mina presentan una mayor oportunidad de ser automatizadas, debido a la baja interoperabilidad que necesitan y la baja variabilidad de su zona de trabajo principalmente.

En cambio, las operaciones pertenecientes a las etapas de preparación minera y actividades auxiliares requieren de una mayor cantidad de años para el desarrollo de la tecnología, debido a que son operaciones en que los equipos tienen una gran interacción con el personal, entre equipos y las zonas de trabajo son variables, siendo las operaciones de desarrollo de infraestructura y mantenimiento de equipos las que requieren una mayor cantidad de años para automatizar.

## **Análisis de Seguridad**

Teniendo en cuenta a la seguridad como uno de los principales ejes de trabajo en la minería, se considera que el nivel de riesgo que presentan las operaciones es un criterio importante para la búsqueda de las mejores oportunidades de automatización, siendo las operaciones que presentan un mayor riesgo las más tentativas a automatizar.

Se realizó un análisis de seguridad de las operaciones mineras, evaluando las tasas de accidentes y fatalidades en este tipo de faenas. Se concluye que las tasas han ido disminuyendo con los años, debido a las nuevas tecnologías y protocolos de seguridad implementados, llegando a presentar las menores tasas dentro de las actividades económicas del país, pero nunca se ha llegado a la meta de cero accidentes y fatalidades. A partir de este análisis se determinó que las operaciones mineras catalogadas como gran minería y las faenas de minería subterránea son las que presentan el mayor porcentaje de accidentes y fatalidades dentro de las distintas operaciones mineras (aproximadamente el 45%), siendo las minas de block y panel caving pertenecientes en ambas categorías.

También se lleva a cabo un análisis de los tipos de accidentes que ocurren en las faenas mineras y la frecuencia con la cual suceden. Se determinó que la mayoría de los accidentes en la minería ocurren debido a la exposición del personal a las frentes de trabajo y la interacción del personal con equipos mineros de gran envergadura o energía en espacios confinados, como lo son las minas subterráneas.

Se cuantificó la intensidad en el uso de personal que presenta cada operación estableciendo el número de personal requerido y la frecuencia con la que esta se realiza, obteniendo como resultado la cantidad de horas hombre trabajadas en cada una. En base a esto, se determinó que las operaciones pertenecientes a los ciclos de trabajo convencionales de perforación y tronadura y las involucradas en la etapa de operación mina son las que presentan una mayor intensidad en el uso de personal debido a que son operaciones que se realizan de manera continua en la mina. Mientras que las operaciones auxiliares de apoyo, y operaciones que se llevan a cabo a causa de eventos singulares, son las que presentan una menor intensidad en el uso de personal.

Se definió un rango denominado nivel de riesgo humano, que se basa en el nivel de exposición que presenta el personal según el tipo de operación que realiza. Se evalúa la locación de la operación, el nivel de riesgo que representa la zona de trabajo, el tipo de trabajo que realiza y el tipo de interacción que tiene el personal con los equipos.

Tabla 36: Número de operaciones por nivel de riesgo humano.

Nivel de Riesgo Humano	Número de Operaciones	Ejemplo
<b>R1</b>	23	Perforación de Avance Horizontal
<b>R2</b>	21	Instalación de Carpeta de Rodado
<b>R3</b>	1	Chequeo de Gases
<b>R4</b>	8	Extracción de Marina (Telecomandada)
<b>R5</b>	5	Transporte por Correas

Debido a que la seguridad es un concepto variable y complejo de cuantificar, se desarrolló un índice de riesgo el cual se basa en una serie de criterios definidos a partir del estudio de seguridad realizado y del nivel de riesgo humano previamente definido. Cada criterio establece cierto grado de exposición del personal o características de la operación que influyen en la seguridad, a los cuales se les otorga una serie de puntajes. El índice de riesgo queda definido como la suma de todos los puntajes otorgados a cada característica por operación, permitiendo establecer del nivel de riesgo al cual se expone al personal en cada operación.

Al realizar la evaluación, se logró determinar que la mayoría de las operaciones (75%) presenta un alto grado de exposición y de riesgo para el personal. Las operaciones que presentan un mayor índice de riesgo son las que están involucradas directamente con labores en la frente de trabajo y en el desarrollo de infraestructuras. Este análisis permite concluir que la mayoría de las operaciones realizadas actualmente en la mina exponen en gran medida al personal a condiciones de alto riesgo, lo cual puede ser solucionado mediante la automatización de las operaciones que permitiría el retiro del personal de la frente de trabajo.

## Impacto en Producción

Debido a que el cumplimiento del plan de producción es el principal objetivo que tienen las operaciones mineras, se establece que el impacto en la producción que presenta cada operación es un factor importante a evaluar al momento de seleccionar las operaciones más tentativas para automatizar.

Para cuantificar el impacto que tiene cada operación de manera equivalente, se desarrolla un índice de impacto en producción, el cual varía según tipo de operación basándose en los distintos KPI's que se utilizan para medir el rendimiento de los equipos. Se consideró que las etapas de preparación minera y operación mina tienen una relevancia equivalente en la operación, debido a la necesidad de desarrollar el área previo a la extracción de esta o que interactúan directamente con las

operaciones de producción como es el caso de las operaciones de Panel Caving. Las operaciones fueron evaluadas de manera individual, independiente si se llevan a cabo de manera paralela en varias frentes o niveles. Esto para cuantificar la verdadera significancia que tiene cada una en la producción y el impacto que significaría la falla de ellas. Se evaluó a las operaciones pertenecientes a la etapa de operación mina según el tonelaje involucrado en cada una de ellas (tph), mientras que para las operaciones pertenecientes a la preparación minera y actividades auxiliares se evaluaron según su significancia con respecto al tiempo de ciclo total al cual pertenecen.

*Tabla 37: Clasificación de impacto en producción.*

<b>Impacto en Producción</b>	<b>Valor Índice de Impacto en Producción</b>
Bajo	0-5%
Medio	5-10%
Alto	>10%

En base a esto se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Las operaciones pertenecientes al sub-proceso de transporte son las que presentan en promedio el mayor impacto en la producción, 36,6%. Esto se debe a que este tipo de operaciones mueven una gran cantidad de mineral acumulado, el cual proviene de los niveles de producción, funcionando como cuello de botella al final del proceso de extracción.
- Las operaciones involucradas en la instalación de infraestructura, desarrollos horizontales y abastecimiento son las que en promedio presentan un impacto medio en la producción. Esto se debe a que son las que poseen un mayor tiempo de ciclo dentro de las operaciones de preparación minera y se llevan a cabo con regularidad dentro de la operación, abarcando la mayor parte del tiempo de ciclo total.
- Las operaciones pertenecientes al sub-proceso de operación mina presentan en promedio un impacto medio en la producción debido a que son evaluadas de manera individual, independiente de si una operación se lleva a cabo de manera paralela en varias frentes o calles (ej: carguío LHD que se realiza de manera paralela en más de una frente). Si se evaluara el impacto general que tiene el conjunto de estas operaciones se tendría un impacto equivalente a las operaciones de transporte de mineral, ya que el ritmo de producción en la mina intenta ser lo más equivalente posible entre niveles, para generar una producción continua de mineral.
- El resto de las operaciones presentan un impacto en la producción bajo, debido principalmente a que no se realizan de manera continua dentro de la operación o presentan tiempos de ciclo muy cortos los cuales tienen un bajo impacto.

## **Selección de Oportunidades de Automatización**

Para la selección de las operaciones más tentativas para automatizar se hizo una comparación entre los factores analizados previamente:

- Índice de Riesgo v/s Años para Automatizar
- Impacto en Producción v/s Años para Automatizar

Se realizó la evaluación según los rangos establecidos para los años necesarios para automatizar (0-4 años, 4-6 años, >6 años), de la cual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se pudo establecer que las operaciones posibles de automatizar en el corto plazo representaban un impacto mínimo en la producción y un nivel de riesgo promedio con las demás operaciones.
- Las operaciones con posibilidad de automatización en el mediano plazo presentan un gran impacto en la producción, un nivel de riesgo medio-alto en comparación al promedio y una cantidad de años razonable para automatizar en el corto-mediano plazo, haciendo de estas operaciones tentativas a seleccionar para evaluar su automatización.
- Las operaciones en el largo plazo presentan un impacto en la producción y un nivel de riesgo similar a las operaciones de mediano plazo, pero la cantidad de tiempo necesario para lograr su automatización es mayor y en muchos casos incierto, por lo que al igual que las de corto plazo no representan una oportunidad tentativa de automatización.

Analizando las operaciones pertenecientes al rango de tiempo de mediano plazo para la automatización, se seleccionaron las que presentan un alto impacto en la producción en conjunto con un alto nivel de riesgo. Así se concluyó, que las operaciones que representan una gran oportunidad de automatización son:

- LHD preparación
- Carguío de Explosivos
- Perforación de Avance
- Perforación y Fortificación de Pernos

## **Oportunidades de Automatización**

La evaluación de la automatización de las operaciones seleccionadas permite obtener las siguientes conclusiones:

- La automatización de las operaciones representa un aumento inmediato en la seguridad. Se reduce significativamente la exposición del personal a los riesgos inherentes presentes en la minería subterránea.
- Aunque se automaticen las operaciones, se requiere de igual manera que haya personal presente en faena para realizar la operación. La diferencia es que este personal estará limitado a apoyar la operación durante limitados periodos de tiempo y ya no tendrá que ser expuesto directamente a las zonas de trabajo.
- No es posible estimar actualmente si existiría una ganancia en el rendimiento de las operaciones, pero si se concluye que la calidad de los productos (ej: Terminación de las

perforaciones, el carguío de explosivos, la instalación de pernos) sería mejorada debido a los sistemas de control que presentan los equipos autónomos.

- Se logra mejorar el mantenimiento de los equipos gracias a los controles del sistema que presenta el equipo autónomo, reduciendo la cantidad de fallas operacionales y mantenciones.
- El consumo de insumos (ej: aceros de perforación, diésel, explosivos) se vería reducido debido a un mejor control de las variables operacionales que presenta el equipo autónomo.
- Los equipos autónomos todavía están limitados en cuanto a su libertad de operación debido a la gran variabilidad que presenta la faena, con frentes de trabajo variables y una alta interacción entre equipos y personal. En el corto y mediano plazo, no es posible desarrollar e implementar un sistema con este grado de interacción y que garantice la seguridad dentro de la operación, por lo que las operaciones telecomandada-asistida y semiautónoma se presentan como una solución factible a este problema.
- La automatización de operaciones pertenecientes a un mismo ciclo, permitiría aumentar la productividad del ciclo ya que un operador podría trabajar en más de una de las operaciones presentes, transportando distintos equipos a la frente, transportando o reabasteciendo insumos a los equipos en la frente o ayudando en la conexión de redes y monitoreo de los equipos. Disminuyendo de igual manera el número de personal expuesto al riesgo de la mina.

## **Oportunidades de Automatización de Actividades Secundarias**

Se analizaron una serie de operaciones las cuales se clasificaron como aisladas, debido a que no pertenecen a ningún ciclo dentro de la preparación minera u operación mina, pero que se realizan de igual forma dentro de la mina en ciertas circunstancias o eventos. Todas estas operaciones son realizadas de manera manual y se basan principalmente en la evaluación de zonas de riesgo, por lo cual presentan un gran nivel de exposición al personal que las realiza.

Se logra concluir que:

- El uso de sensores manuales para medir variables operacionales o de seguridad dentro de la mina expone a situaciones de riesgo al personal, esto puede ser solucionado mediante la automatización de estos equipos. El uso de sensores autónomos permitiría una medición continua y precisa de las variables, evitando el sesgo causado por las mediciones manuales realizadas actualmente y permitiría retirar al personal de zonas de alto riesgo generadas por una alta concentración de gases o frentes activas.
- La utilización de equipos autónomos o telecomandados para inspeccionar galerías abandonadas permitiría retirar de manera definitiva al personal expuesto en esta operación, la cual se lleva a cabo en zonas abandonadas las cuales presentan una nula mantención de su infraestructura y cercana al o dentro de la zona de transición del hundimiento.
- El chequeo de los puntos de extracción se realiza para medir una serie de variables (estado del punto, condiciones de la pista, ley, granulometría, humedad) las cuales no todas son medidas de manera autónoma, exponiendo al personal a condiciones de riesgo. También, se busca prevenir de manera efectiva, mediante la medición de estas variables, eventos de riesgo extremo como lo son las situaciones de agua barro que ponen en riesgo al personal

y la continuidad operacional. El uso de sensores y equipos de extracción autónomos permitiría evitar que el personal se exponga a estos riesgos, medir de manera continua y precisa estas variables obteniendo como resultado una operación más segura.

En general la automatización o telecomando de estas operaciones no representaría una ganancia en la producción o utilización de los equipos debido a la clasificación de operación aislada que presentan, pero generaría un aumento significativo en la seguridad de la operación evitando que personal, cuya tarea principal generalmente es otra, se ahorre la necesidad de exponerse a condiciones de alto riesgo y puedan enfocarse en sus otras tareas.

## **Recomendaciones a Futuro**

Se recomienda ampliar la metodología planteada para evaluar las posibilidades de automatización de las distintas operaciones, evaluando los aspectos económicos que significarían el desarrollo e implementación de estas nuevas tecnologías.

También, se recomienda realizar una evaluación más detallada de las operaciones relacionadas que pertenecen al mismo ciclo. Las cuales, individualmente puede que no sea beneficioso automatizar, pero si lo sea la automatización en conjunto de las operaciones pertenecientes a un mismo ciclo.

Por último, debido a la variabilidad que existe entre las distintas minas, aunque sean explotadas a través del mismo método, se recomienda realizar este estudio de manera individual con los parámetros específicos de cada mina para así obtener resultados representativos de cada operación.

## 11. Bibliografía

- [1] Chapter 13.10 “Block Caving”, SME Mining Engineering Handbook, 2011.
- [2] Guía de la Minería Subterránea. Métodos y Aplicación, AtlasCopco, 1968.
- [3] Nuevo Nivel Mina, Jorge Revuelta, Codelco, 2011.
- [4] Informe Practica Profesional III, Camilo Salvador, Universidad de Chile, 2018.
- [5] Optimización de los Procesos de Desarrollo y Construcción en Minería de Block Caving: Caso de Estudio Mina El Teniente Codelco Chile, Jorge Camhi, Universidad de Chile, 2012.
- [6] Simulación como Herramienta para la Planificación de la Preparación Minera en Minería Tipo Block/Panel Caving, Camila Contreras, Universidad de Chile, 2016.
- [7] Aplicación de Filosofía Lean en la Preparación Minera, Mina El Teniente Codelco Chile, Johnny Ccatamayo, Universidad de Chile, 2017.
- [8] Modelo de Costo Basado en Actividades para la Gestión de Operaciones de una Mina Subterránea Explotada por Block Caving, Marcelo Vergara, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2015.
- [9] Autonomous and Remote Operation Technologies in Australian Mining, K. McNab y M. Garcia-Vasquez, CSIRO Minerals Down Under National Research Flagship, 2011.
- [10] Autonomous and Remote Operation Technologies in the Mining Industry: Benefits and Costs, Brian Fisher y Sabine Schnitteger, BAEconomics, 2011.
- [11] Informe Anual: Estadísticas de Seguridad Social, Superintendencia de Seguridad Social, 2018.
- [12] Accidentabilidad Minera 2018, Sernageomin, 2018.
- [13] Autonomous Systems: Social, Legal and Ethical Issues, The Royal Academy of Engineering, 2009.
- [14] Mine of the Future, Rio Tinto, 2008.
- [15] Semi-autonomous Mining Model, M. Fishwick y M. Telias, Caving 2014, 2014.
- [16] Future Automated Mine Operation: Synergistic Collaboration Between Humans and Automated Systems, J. Ruiz-del-Solar, E. Widzyk-Capehart, P. Vallejos, R. Asenjo, Caving 2014, 2014.
- [17] Diseño y Evaluación Técnico Económica de un Nuevo Sistema Carguío y Transporte para la Minería de Hundimiento, Chang Ja Kim, Universidad de Chile, 2019.
- [18] AtlasCopco, Luis Pozo, AtlasCopco, 2009.
- [19] Preparación Minera con Equipos Autónomos y Semiautonomos, Antonio Rabajille, Universidad de Chile, 2017.
- [20] Productividad Determinada por Simulaciones de un Sistema Minero Subterraneo Agregado por Niveles, Rachid Manzur, Universidad de Chile, 2015.

- [21] Chuquicamata Underground Mine Design: The Simplification of the Ore Handling System of Lift 1, P. Paredes, T. Leaño, L. Jauriat, Caving 2018, 2018.
- [22] Tronadura y excavaciones, Raúl Chaparro, Universidad de Chile, 2018.
- [23] Estándar Consideraciones y Recomendaciones de Diseño e Instalación para Sistemas de Confinamiento Aplicables a Sistemas Autónomos/Semiautónomos Mina Subterránea, Norma Vargas, Codelco, 2013
- [24] Estándares operacionales para Desarrollos Horizontales en la Mina Esmeralda. Teniente Chile, Geovita, 2015.
  
- [25] Detección y Control de Atmósferas Explosivas en Minas Subterráneas de Carbón Usando Programación Estructurada, D. R. Echeverri, Revista Educación en Ingeniería, 7(14), 10-21, 2012.
- [26] Sensado Inalámbrico de Gases en Minería con Servicio Web en Tiempo Real, J. Salamanca, G. Gutiérrez, M. Albarracín, E. Fernández, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2014.
- [27] Cuantificación del Riesgo de Ingreso de Agua-Barro en El Teniente, Álvaro Andrés Pérez Lara, Universidad de Chile, 2017.
- [28] Selección y Diseño de Sensores de Humedad para Minería Block Caving, Claudio Casafont, Universidad de Chile, 2017.
- [29] Estudio y Análisis de Estrategias de Extracción de Agua-Barro en la Fase II de Mina Diablo Regimiento, Ignacio Soto, Universidad de Chile, 2018.
- [30] Mudrush Risk Evaluation, J. Jakubec, R. Clayton, R. Guest, SRK Consulting, Vancouver, 2013.
- [31] Estabilización de Macizos Rocosos, Javier Vallejos, Universidad de Chile, 2012.
- [32] Desarrollo de Herramienta de Diseño para la Estabilidad de Excavaciones con Entrada de Personal, Sindy Burgos, Universidad de Chile, 2015.
- [33] The Comparison of Automatic and Manual Loading in an Underground Mining Environment, Simon Marklund, Lulea University of Technology, 2017.
- [34] A Navigation System for Automated Loaders in Underground Mines, J. Carsson, M. Broxwall, 5<sup>th</sup> International Conference on Field Robotics, 2005.
- [35] Asignación Dinámica de Operadores de LHD para Operación a Distancia en Minería Subterránea, Francisco Carrasco, Universidad de Chile, 2016.

## **12. Anexos**

### **A.1 Análisis de Desarrollo e Implementación de Tecnología Autónoma**

En la Tabla 38 y Tabla 39 se puede ver el cálculo en detalle de los años requeridos para telecomandar y automatizar cada operación. Para desarrollar esto primero se realizó una reunión con los miembros del Laboratorio de robótica de campo, perteneciente al grupo de Automatización en Minería del AMTC, en la cual cada uno determino la cantidad de años en base a su criterio que serían requeridos para telecomandar y automatizar cada una de las operaciones en base a los supuestos operacionales y de la industria previamente establecidos. A partir de la cantidad de años estimada por cada miembro se calculó el promedio, la varianza y la desviación estándar de los datos estableciendo que la cantidad de años necesarios para automatizar cada operación sería el promedio estimado más la varianza.

Tabla 38: Anexo Estimación en detalle de desarrollo e implementación de tecnología telecomandada

Operación	Estado de Automatización	Estimación Esfuerzo Telecomandada [años]			
		Promedio	Var.	Desv. Est.	Total
Acuñadura Mecanizada	Manual	3.29	0.20	0.49	3.49
Reducción Secundaria con Martillo Móvil	Manual	3.57	0.53	0.79	4.10
Perforación para Tronadura Secundaria	Manual	3.57	0.24	0.53	3.82
Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	Manual	3.57	0.24	0.53	3.82
Tronadura Secundaria	Manual	3.13	0.30	0.63	3.42
Limpieza Pista	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Reparación de Pista	Manual	3.83	0.14	0.41	3.97
Infraestructuras	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Redes	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Buzones	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Equipos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Martillos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Insumos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Perforación Radial para Socavación	Manual	4.00	0.00	0.00	4.00
Moneo	Manual	5.25	1.19	1.26	6.44
Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Manual	4.14	0.12	0.38	4.27
Tronadura de Tiros Radiales	Manual	2.88	0.05	0.25	2.92
Carguío LHD	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte LHD	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Descarga LHD	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Reducción Martillo Móvil	Manual	3.57	0.24	0.53	3.82
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Limpieza de Cámaras	Manual	2.92	0.03	0.20	2.95
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte por Ferrocarril	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte por Correos	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte CAEX	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Instalación Sistema de Confinamiento	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Perforación Radial para Socavación	Manual	4.00	0.00	0.00	4.00
Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Manual	4.17	0.14	0.41	4.31
Tronadura de Socavación	Manual	3.10	0.24	0.55	3.34
Raise Borer Drilling	Manual	5.60	0.64	0.89	6.24
Blind Hole Drilling	Manual	4.00	0.29	0.58	4.29

Marcado de Frente	Manual	3.00	0.00	0.00	3.00
Perforación de Avance Horizontal	Manual	3.86	0.12	0.38	3.98
Limpieza de Zapatera de Frente	Manual	4.00	0.57	0.82	4.57
Carguío de Explosivos	Manual	4.17	0.47	0.75	4.64
Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	Manual	2.88	0.05	0.25	2.92
Ventilación	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Chequeo de Frente (gases)	Manual	2.90	0.04	0.22	2.94
Fotogrametría en 3D	Manual	3.29	0.20	0.49	3.49
Regado de Frente	Manual	3.29	0.20	0.49	3.49
Extracción de Marina	Telecomandada	0.00	0.00	0.00	0.00
Acuñadura Mecanizada	Manual	3.17	0.14	0.41	3.31
Perforación Perno-Cable	Manual	3.71	0.20	0.49	3.92
Anclaje Perno-Cable	Manual	3.71	0.20	0.49	3.92
Instalación y Fraguado de Perno Cable	Manual	3.57	0.24	0.53	3.82
Instalación Malla y Planchuela- Tuerca	Manual	4.50	0.25	0.55	4.75
Aplicación de Shotcrete	Telecomandada	3.50	0.25	0.71	3.75
Construcción de Cama de Mineral	Manual	3.86	0.12	0.38	3.98
Limpieza de Pista	Telecomandada	3.40	0.24	0.55	3.64
Hormigonado de Pista	Manual	3.86	0.41	0.69	4.27
Carpeta de Rodado	Manual	3.86	1.27	1.21	5.12
Instalación Marco en Visera	Manual	7.00	1.00	1.41	8.00
Marcación de Pernos Split-Set	Manual	3.43	0.24	0.53	3.67
Perforación de Pernos Split-Set	Manual	3.71	0.20	0.49	3.92
Instalación de Pernos Split-Set	Manual	3.71	0.20	0.49	3.92
Red Hidráulica	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Eléctrica	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Neumática	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50

Tabla 39: Anexo Estimación en detalle de desarrollo e implementación de tecnología autónoma.

Operación	Estado de Automatización	Estimación Esfuerzo Automatización [años]			
		Promedio	Var.	Desv. Est.	Total
Acuñadura Mecanizada	Manual	5.43	0.24	0.53	5.67
Reducción Secundaria con Martillo Móvil	Manual	5.14	0.69	0.90	5.84
Perforación para Tronadura Secundaria	Manual	5.57	1.10	1.13	6.67
Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	Manual	5.00	0.57	0.82	5.57
Tronadura Secundaria	Manual	3.25	0.19	0.50	3.44
Limpieza Pista	Telecomandada	4.29	1.63	1.38	5.92
Reparación de Pista	Manual	5.71	1.06	1.11	6.78
Infraestructuras	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Redes	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Buzones	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Equipos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Martillos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Insumos	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Perforación Radial para Socavación	Manual	5.29	0.49	0.76	5.78
Moneo	Manual	6.75	1.19	1.26	7.94
Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Manual	5.14	0.12	0.38	5.27
Tronadura de Tiros Radiales	Manual	3.00	0.00	0.00	3.00
Carguío LHD	Telecomandada	3.57	0.53	0.79	4.10
Transporte LHD	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Descarga LHD	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Reducción Martillo Móvil	Manual	5.29	0.49	0.76	5.78
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	4.43	0.53	0.79	4.96
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	4.43	0.53	0.79	4.96
Limpieza de Cámaras	Manual	2.92	0.03	0.20	2.95
Reducción Martillo Fijo	Telecomandada	4.33	0.56	0.82	4.89
Transporte por Ferrocarril	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte por Correas	Autónoma	0.00	0.00	0.00	0.00
Transporte CAEX	Telecomandada	4.17	1.14	1.17	5.31
Instalación Sistema de Confinamiento	Manual	2.00	0.00	0.00	2.00
Perforación Radial para Socavación	Manual	5.33	0.56	0.82	5.89
Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	Manual	5.50	0.58	0.84	6.08
Tronadura de Socavación	Manual	3.60	1.44	1.34	5.04
Raise Borer Drilling	Manual	7.40	1.04	1.14	8.44
Blind Hole Drilling	Manual	6.17	1.81	1.47	7.97

Marcado de Frente	Manual	3.60	0.24	0.55	3.84
Perforación de Avance Horizontal	Manual	4.86	0.41	0.69	5.27
Limpieza de Zapatera de Frente	Manual	5.57	0.53	0.79	6.10
Cargío de Explosivos	Manual	5.00	0.57	0.82	5.57
Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	Manual	3.50	0.75	1.00	4.25
Ventilación	Autónoma		0.00	0.00	0.00
Chequeo de Frente (gases)	Manual	3.10	0.24	0.55	3.34
Fotogrametría en 3D	Manual	4.29	0.49	0.76	4.78
Regado de Frente	Manual	4.14	0.41	0.69	4.55
Extracción de Marina	Telecomandada	3.86	0.41	0.69	4.27
Acuñadura Mecanizada	Manual	5.33	0.22	0.52	5.56
Perforación Perno-Cable	Manual	4.71	0.49	0.76	5.20
Anclaje Perno-Cable	Manual	4.86	0.41	0.69	5.27
Instalación y Fraguado de Perno Cable	Manual	4.86	0.69	0.90	5.55
Instalación Malla y Planchuela- Tuerca	Manual	5.86	0.41	0.69	6.27
Aplicación de Shotcrete	Telecomandada	5.14	0.41	0.69	5.55
Construcción de Cama de Mineral	Manual	5.00	0.57	0.82	5.57
Limpieza de Pista	Telecomandada	4.29	0.78	0.95	5.06
Hormigonado de Pista	Manual	5.43	0.82	0.98	6.24
Carpeta de Rodado	Manual	5.43	2.82	1.81	8.24
Instalación Marco en Visera	Manual	10.00	4.00	2.83	14.00
Marcación de Pernos Split-Set	Manual	4.43	0.24	0.53	4.67
Perforación de Pernos Split-Set	Manual	4.71	0.20	0.49	4.92
Instalación de Pernos Split-Set	Manual	4.57	0.53	0.79	5.10
Red Hidráulica	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Eléctrica	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Neumática	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50
Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	Manual	12.50	1.00	1.41	13.50

## A.2 Análisis de Seguridad

En la Tabla 40 se aprecian los datos estimados para determinar la intensidad de uso de personal por operación dentro de la mina. Para ello se estimó número promedio de personas involucradas por operación a partir de estudios realizados previamente (Camhi, 2012; Rabajille, 2017; Ccatamayo, 2017). A partir de estos estudios también fue posible determinar el tiempo de ciclo de cada operación y la cantidad de veces en promedio que se realiza cada actividad por mes. La multiplicación de estos datos permite determinar la cantidad de horas hombre promedio involucradas por operación.

Tabla 40: Anexo cuantificación de intensidad de uso de personal por operación.

Sub-Proceso	Operación	Nº de Personal	Tiempo Ciclo [hr]	Actividad/ Mes	HH/Mes
Socavación	Perforación Radial para Socavación	2	2.92	16	93
	Moneo	4	12	5	240
	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	3	1.33	16	64
	Tronadura de Tiros Radiales	2	0.5	16	16
Producción	Carguío LHD	1	10.2	60	612
	Transporte LHD	1	10.20	60	612
	Descarga LHD	1	10.2	60	612
	Reducción Martillo Móvil	1	0.5	60	30
	Reducción Martillo Fijo	1	0.25	90	23
Traspaso	Reducción Martillo Fijo	1	0.25	90	23
	Limpieza de Cámaras	1	0.5	60	30
Transporte	Reducción Martillo Fijo	1	0.25	90	23
	Transporte por Ferrocarril	1	10.2	60	612
	Transporte por Correas	1	12	60	720
	Transporte CAEX	1	10.2	60	612
Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	6	1.6	20	192
Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	2	0.50	60	60
	Perforación de Avance Horizontal	2	2.92	60	350
	Limpieza de Zapatera de Frente	2	0.50	60	60
	Carguío de Explosivos	4	1.33	60	320
	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y asilación del sector)	2	0.50	60	60
	Ventilación	0	0.75	60	0
	Chequeo de Frente (gases)	1	0.25	60	15

	Fotogrametría en 3D	2	0.25	60	30
	Regado de Frente	1	0.33	60	20
	Extracción de Marina	1	2.33	60	140
	Acuñadura Mecanizada	2	0.50	60	60
	Perforación Perno-Cable	2	1.33	60	160
	Anclaje Perno-Cable	3	1.00	60	180
	Instalación y Fraguado de Perno-Cable	3	1.00	60	180
	Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	3	0.83	60	150
	Aplicación de Shotcrete	2	0.50	60	60
	Construcción de Cama de Mineral	2	0.50	60	60
	Limpieza de Pista	1	0.50	60	30
	Hormigonado de Pista	4	15.60	30	1872
	Carpeta de Rodado	4	24.00	30	2880
	Instalación Marco en Visera	4	54.00	2	432
	Marcación de Pernos Split-Set	1	0.25	60	15
	Perforación de Pernos Split-Set	2	0.25	60	30
	Instalación de Pernos Split-Set	2	0.17	60	20
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	6	0.25	60	90
	Red Eléctrica	6	0.25	60	90
	Red Neumática	6	0.25	60	90
	Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	6	0.25	60	90
Desarrollos Verticales	Raise Borer Drilling	2	20.00	5	200
	Blind Hole Drilling	2	20.00	5	200
Apoyo	Acuñadura Mecanizada	1	0.50	6	3
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	1	0.50	6	3
	Perforación para Tronadura Secundaria	2	2.92	6	35
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	2	0.50	6	6
	Tronadura Secundaria	2	0.50	6	6
	Limpieza Pista	1	0.50	6	3
	Reparación de Pista	2	0.50	6	6
Mantenimiento	Infraestructuras	2	12.00	30	720
	Redes	2	12.00	30	720
	Buzones	2	12.00	15	360
	Equipos	2	12.00	60	1440
	Martillos	2	12.00	15	360
Abastecimiento	Insumos	2	0.75	60	90

En la Tabla 41 se muestran las opciones seleccionadas para cada criterio utilizado en el cálculo índice de riesgo de cada operación.

Tabla 41: Evaluación de criterios de índice de riesgo por operación.

Sub-Proceso	Operación	Criterio					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Socavación	Perforación Radial para Socavación	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Moneo	R2	bajo-no	alto-si	medio	bajo-no	medio
	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	R1	bajo-no	alto-si	medio	bajo-no	alto-si
	Tronadura de Tiros Radiales	R2	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si	bajo-no
Producción	Carguío LHD	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Transporte LHD	R5	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Descarga LHD	R5	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Reducción Martillo Móvil	R2	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	medio
	Reducción Martillo Fijo	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
Traspaso	Reducción Martillo Fijo	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Limpieza de Cámaras	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
Transporte	Reducción Martillo Fijo	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Transporte por Ferrocarril	R5	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Transporte por Correas	R5	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Transporte CAEX	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	R2	bajo-no	alto-si	medio	bajo-no	medio

Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	R1	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no	bajo-no
	Perforación de Avance Horizontal	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Limpieza de Zapatera de Frente	R1	alto-si	alto-si	medio	medio	alto-si
	Carguío de Explosivos	R1	bajo-no	alto-si	medio	bajo-no	alto-si
	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	R2	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Ventilación	R5	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Chequeo de Frente (gases)	R3	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no	bajo-no
	Fotogrametría en 3D	R2	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no	bajo-no
	Regado de Frente	R1	bajo-no	alto-si	medio	bajo-no	medio
	Extracción de Marina	R4	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Acuñadura Mecanizada	R1	alto-si	alto-si	medio	medio	alto-si
	Perforación Perno-Cable	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Anclaje Perno-Cable	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Instalación y Fraguado de Perno-Cable	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Aplicación de Shotcrete	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Construcción de Cama de Mineral	R1	alto-si	alto-si	alto-si	bajo-no	medio
	Limpieza de Pista	R2	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Hormigonado de Pista	R2	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	medio

	Carpeta de Rodado	R2	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	medio
	Instalación Marco en Visera	R2	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	medio
	Marcación de Pernos Split-Set	R1	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	bajo-no
	Perforación de Pernos Split-Set	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Instalación de Pernos Split-Set	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	medio
	Red Eléctrica	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	medio
	Red Neumática	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	medio
	Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Te leoperados	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	medio
	Raise Borer Drilling	R1	bajo-no	bajo-no	medio	medio	alto-si
	Blind Hole Drilling	R1	bajo-no	bajo-no	medio	medio	alto-si
Apoyo	Acuñadura Mecanizada	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Perforación para Tronadura Secundaria	R1	alto-si	alto-si	alto-si	medio	alto-si
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	R1	bajo-no	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si
	Tronadura Secundaria	R2	alto-si	alto-si	bajo-no	alto-si	bajo-no
	Limpieza Pista	R4	alto-si	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no

	Reparación de Pista	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	medio
Mantenimiento	Infraestructuras	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no
	Redes	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no
	Buzones	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no
	Equipos	R2	bajo-no	bajo-no	bajo-no	bajo-no	bajo-no
	Martillos	R2	bajo-no	bajo-no	alto-si	bajo-no	bajo-no
Abastecimiento	Insumos	R2	bajo-no	bajo-no	bajo-no	bajo-no	bajo-no

En la Tabla 42 se muestran los puntajes asociados a las opciones seleccionadas para cada criterio mostradas en la Tabla 41. La suma de estos puntajes se utiliza para calcular el índice de riesgo de cada operación (Ecuación 3).

Tabla 42: Puntaje asignado por criterio para desarrollo de índice de riesgo

Sub-Proceso	Operación	Puntaje						Total
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	
Socavación	Perforación Radial para Socavación	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
	Moneo	6	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25	8
	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	8	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	10.25
	Tronadura de Tiros Radiales	6	0	0.5	0	0	0	6.5
Producción	Carguío LHD	2	0	0	0	0	0	2
	Transporte LHD	0	0	0	0	0	0	0
	Descarga LHD	0	0	0	0	0	0	0
	Reducción Martillo Móvil	6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	8.25
	Reducción Martillo Fijo	2	0	0	0	0	0	2
Traspaso	Reducción Martillo Fijo	2	0	0	0	0	0	2
	Limpieza de Cámaras	2	0	0	0	0	0	2
Transporte	Reducción Martillo Fijo	2	0	0	0	0	0	2
	Transporte por Ferrocarril	0	0	0	0	0	0	0
	Transporte por Correas	0	0	0	0	0	0	0
	Transporte CAEX	2	0	0	0	0	0	2
Infraestructura	Instalación Sistema de Confinamiento	6	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25	8
Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	8	0.5	0.5	0	0.5	0	9.5
	Perforación de Avance Horizontal	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75

Limpieza de Zapatera de Frente	8	0	0.5	0.25	0.25	0.5	9.5
Carguío de Explosivos	8	0.5	0.5	0.25	0.5	0.5	10.25
Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	6	0	0.5	0	0	0	6.5
Ventilación	0	0	0	0	0	0	0
Chequeo de Frente (gases)	4	0.5	0.5	0	0.5	0	5.5
Fotogrametría en 3D	6	0.5	0.5	0	0.5	0	7.5
Regado de Frente	8	0.5	0.5	0.25	0.5	0.25	10
Extracción de Marina	2	0	0.5	0	0	0	2.5
Acuñadura Mecanizada	8	0	0.5	0.25	0.25	0.5	9.5
Perforación Perno-Cable	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Anclaje Perno-Cable	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Instalación y Fraguado de Perno-Cable	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Aplicación de Shotcrete	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Construcción de Cama de Mineral	8	0	0.5	0.5	0.5	0.25	9.75
Limpieza de Pista	6	0	0.5	0	0	0	6.5
Hormigonado de Pista	6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	8.25
Carpeta de Rodado	6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	8.25
Instalación Marco en Visera	6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.25	8.25
Marcación de Pernos Split-Set	8	0.5	0.5	0.5	0.5	0	10
Perforación de Pernos Split-Set	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
Instalación de Pernos Split-Set	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75

Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	6	0.5	0	0.5	0.5	0.25	7.75
	Red Eléctrica	6	0.5	0	0.5	0.5	0.25	7.75
	Red Neumática	6	0.5	0	0.5	0.5	0.25	7.75
	Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	6	0.5	0	0.5	0.5	0.25	7.75
	Raise Borer Drilling	8	0.5	0	0.25	0.25	0.5	9.5
	Blind Hole Drilling	8	0.5	0	0.25	0.25	0.5	9.5
Apoyo	Acuñadura Mecanizada	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
	Perforación para Tronadura Secundaria	8	0	0.5	0.5	0.25	0.5	9.75
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	10.5
	Tronadura Secundaria	6	0	0.5	0	0	0	6.5
	Limpieza Pista	2	0	0	0	0	0	2
	Reparación de Pista	6	0.5	0	0.5	0.5	0.25	7.75
Mantenimiento	Infraestructuras	6	0.5	0	0.5	0.5	0	7.5
	Redes	6	0.5	0	0.5	0.5	0	7.5
	Buzones	6	0.5	0	0.5	0.5	0	7.5
	Equipos	6	0.5	0	0	0.5	0	7
	Martillos	6	0.5	0	0.5	0.5	0	7.5
Abastecimiento	Insumos	6	0.5	0	0	0.5	0	7

### A.3 Evaluación de Impacto en Producción por Operaciones

En la Tabla 43 se muestra el cálculo del índice de impacto en producción para las operaciones pertenecientes a las etapas de preparación minera y actividades auxiliares. Primero se determinó el tiempo de ciclo y el número de personal en cada operación a partir de estudios realizados previamente (Camhi, 2012; Contreras, 2016; Ccatamayo, 2017; Rabajille, 2017). Este tiempo de ciclo es el que se ve involucrado al desarrollar los casos bases previamente establecidos, con esto se puede determinar las horas hombre involucradas por metro lineal de avance de cada operación y el rendimiento en metros lineales por hora. Luego se establece un tiempo de ciclo total para todas las operaciones involucradas en el mismo sub-proceso (desarrollos horizontales y desarrollos horizontales) y para las operaciones auxiliares se utiliza el tiempo de ciclo total definido en la sección 4. Impacto en Producción. Luego se utiliza la Ecuación 5 para calcular el índice de impacto en producción de cada operación.

Tabla 43: Detalle de impacto en producción operaciones de preparación minera

Sub-Proceso	Operación	Ciclo [hr]	Nº Personal	HH/ml	ml/H	ml/h	II-P
Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.88%
	Perforación de Avance Horizontal	2.92	2	2.06	0.49	1.10	5.11%
	Limpieza de Zapatera de Frente	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.88%
	Carguío de Explosivos	1.33	4	1.58	0.64	2.40	2.34%
	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.88%
	Ventilación	0.75	0	2.34	0.50	4.27	1.31%
	Chequeo de Frente (gases)	0.25	1	0.08	12.80	12.80	0.44%
	Fotogrametría en 3D	0.25	2	0.16	6.40	12.80	0.44%
	Regado de Frente	0.33	1	0.10	9.60	9.60	0.58%
	Extracción de Marina	2.33	1	0.73	1.37	1.37	4.09%
	Acuñadura Mecanizada	0.50	2	1.00	1.02	6.40	0.88%
	Perforación Perno-Cable	1.33	2	2.86	0.36	2.40	2.34%
	Anclaje Perno-Cable	1.00	3	1.62	0.63	3.20	1.75%
	Instalación y Fraguado de Perno-Cable	1.00	3	1.62	0.63	3.20	1.75%
	Instalación Malla y Planchuela-Tuerca	0.83	3	1.61	0.64	3.84	1.46%
	Aplicación de Shotcrete	0.50	2	1.07	0.94	6.40	0.88%
	Construcción de Cama de Mineral	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.88%
	Limpieza de Pista	0.50	1	0.16	6.40	6.40	0.88%
Hormigonado de Pista	15.60	4	19.50	0.05	0.21	27.32%	

	Carpeta de Rodado	24.00	4	30.0 0	0.03	0.13	42.03%
	Instalación Marco en Visera	54.00	4	67.5 0	0.01	0.06	48.60%
	Marcación de Pernos Split-Set	0.25	1	0.08	12.80	12.80	0.44%
	Perforación de Pernos Split-Set	0.25	2	0.16	6.40	12.80	0.44%
	Instalación de Pernos Split-Set	0.17	2	0.10	9.60	19.20	0.29%
Instalación de Infraestructura de Redes y TI	Red Hidráulica	0.25	6	0.47	2.13	12.80	0.44%
	Red Eléctrica	0.25	6	0.47	2.13	12.80	0.44%
	Red Neumática	0.25	6	0.47	2.13	12.80	0.44%
	Red Inalámbrica para Sistemas Autónomos/Teleoperados	0.25	6	0.47	2.13	12.80	0.44%
Desarrollos Verticales	Raise Borer Drilling	20.00	3	18.7 5	0.05	0.16	15.31%
	Blind Hole Drilling	20.00	3	18.7 5	0.05	0.16	13.54%
Apoyo	Acuñadura Mecanizada	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.05%
	Reducción Secundaria con Martillo Móvil	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.05%
	Perforación para Tronadura Secundaria	2.92	2	1.82	0.55	1.10	0.29%
	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria	0.50	4	0.63	1.60	6.40	0.05%
	Tronadura Secundaria	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.05%
	Limpieza Pista	0.50	1	0.16	6.40	6.40	0.05%
	Reparación de Pista	0.50	2	0.31	3.20	6.40	0.05%
Mantenimiento	Infraestructuras	12.00	4	15.0 0	0.07	0.27	1.20%
	Redes	12.00	4	15.0 0	0.07	0.27	1.20%
	Buzones	12.00	4	15.0 0	0.07	0.27	1.20%
	Equipos	12.02	5	18.7 8	0.05	0.27	1.20%
	Martillos	12.00	4	15.0 0	0.07	0.27	1.20%
Abastecimiento	Insumos	0.75	4	0.94	1.07	4.27	6.25%

## A.4 Selección de Oportunidades de Automatización

En la Tabla 44 se muestra el detalle del índice de riesgo e índice de impacto en producción que presentan las categorías de operaciones asociadas para evaluar la automatización de estas. Estos índices son el promedio de los índices individuales de cada operación según categoría.

Tabla 44: Detalle de operaciones asociadas para evaluación, índice de riesgo/índice de impacto en producción.

<b>Categoría</b>	<b>Sub-Proceso</b>	<b>Operación Asociada</b>	<b>Índice de Riesgo</b>	<b>IIP</b>
Perforación de Avance	Socavación	Perforación Radial para Socavación	9.69	6.52%
	Desarrollos Horizontales	Marcado de Frente		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Avance Horizontal		
Carguío de Explosivos	Socavación	Carguío de Explosivos en Tiros Radiales	10.33	2.63%
	Desarrollos Horizontales	Carguío de Explosivos		
	Apoyo	Carguío de Explosivos para Tronadura Secundaria		
Tronadura	Socavación	Tronadura de Tiros Radiales	6.50	1.17%
	Desarrollos Horizontales	Tronadura de Avance Horizontal (Coordinación y aislación del sector)		
	Apoyo	Tronadura Secundaria		
Reducción Martillo Fijo	Producción	Reducción Martillo Fijo	2.00	1.88%
	Traspaso	Reducción Martillo Fijo		
	Transporte	Reducción Martillo Fijo		
LHD Preparación	Traspaso	Limpieza de Cámaras	3.25	5.18%
	Desarrollos Horizontales	Limpieza de Pista		
	Apoyo	Limpieza Pista		
	Desarrollos Horizontales	Extracción de Marina		
Acuñadura Mecanizada	Desarrollos Horizontales	Acuñadura Mecanizada	9.63	0.93%
	Apoyo	Acuñadura Mecanizada		
Perforación y Fortificación de Pernos	Desarrollos Horizontales	Perforación Perno-Cable	9.79	7.01%
	Desarrollos Horizontales	Anclaje Perno-Cable		

	Desarrollos Horizontales	Instalación y Fraguado de Perno-Cable		
	Desarrollos Horizontales	Marcación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Perforación de Pernos Split-Set		
	Desarrollos Horizontales	Instalación de Pernos Split-Set		
Reducción Martillo Móvil	Producción	Reducción Martillo Móvil	9.75	0.05%
	Apoyo	Reducción Secundaria con Martillo Móvil		