



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

**DISEÑO Y OPTIMIZACION DE UNA PAUTA DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS MÓVILES EN  
UNA OPERACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA**

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

**JURAJ NICOLÁS DOMIC BOUZA**

**PROFESOR GUÍA:  
RODOLFO URRUTIA URIBE**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RICARDO SAN MARTÍN ZURITA  
MANUEL REYES JARA**

**SANTIAGO DE CHILE  
SEPTIEMBRE 2013**

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA PAUTA DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS MÓVILES EN  
UN OPERACIÓN MINERA SUBTERRÁNEA**

La industria minera se caracteriza por requerir fuertes inversiones de capital para el desarrollo de proyectos, dentro de los cuales los servicios de construcción pueden concentrar cerca del 45% de los costos de un proyecto. En este contexto, una empresa proveedora especializada en servicios de construcción subterránea presenta un aumento de costos y horas de falla de sus equipos críticos. La disponibilidad física, si bien se mantiene por sobre el promedio requerido, presenta períodos en que se encuentra por debajo del límite de 85%.

A partir de los registros operacionales y de mantenciones de equipos, se busca determinar las condiciones que favorecen la ocurrencia de fallas, como también obtener períodos de trabajo entre mantenciones preventivas que permitan maximizar el beneficio o disponibilidad esperada.

El trabajo se realiza en tres etapas: Consolidación de registros operacionales y mantención, estimación de la probabilidad de falla de equipos a partir del ajuste de distribuciones de probabilidad o modelos de minería de datos, determinar una pauta de mantenimiento para cada tipo de equipo dependiendo del modelo escogido.

De acuerdo a los modelos predictivos, la variable principal corresponde a las horas de mantenimiento correctivo recibido, aumentando la probabilidad de falla en la medida que el equipo recibe mayores horas de reparación. Dejando fuera esta variable, la utilización, productividad y horas de mantenimiento preventivo corresponden a las variables explicativas. Si bien se proponen distintas teorías, la información actual del modelo es insuficiente para determinar la causa principal de este fenómeno. Para el caso de los equipos *scoop* y *jumbo* se obtienen modelos de Regresión Logística y Árbol de Decisión que alcanzan precisiones en torno al 30%, mejorando la proporción inicial de fallas de 8%. La aplicación de modelos predictivos se traduce en un ahorro estimado de 4% sobre los costos de reparación anuales.

A partir del análisis de funciones de probabilidad de falla se determinan intervalos de mantención eficientes para cada equipo: 25 horas efectivas de trabajo para los equipos *dumper*, 2970 metros perforados para equipos *jumbo* y 473 paladas para el caso de equipos *scoop*. Los dos primeros resultados suponen una reducción de los intervalos actuales de la constructora, mientras que para los equipos *jumbo* un leve aumento.

Recomendaciones finales del trabajo incluyen mejorar el sistema de registros, consolidar la información de operador y mecánico, incorporar indicadores de mantenimiento preventivo y realizar un seguimiento de equipos reparados. Aplicar los modelos a nivel de equipos y componentes, como también incorporar nuevas variables explicativas, pueden ser alternativas interesantes de trabajo futuro.

## Agradecimientos

Hoy doy término a una de las etapas más importantes de mi vida, terminando lo que comenzó en Marzo del año 2007. Quisiera aprovechar este espacio para agradecer a todas las personas que de alguna u otra manera me han ayudado a completar este proceso con éxito.

En primer lugar, agradecer a Penta Analytics. Por haberme permitido incorporarme a la empresa y haber podido desarrollar durante este tiempo el tema de memoria. Agradecer de manera particular al Profesor Luis Aburto, Andrés Gormaz, Cristián Nuñez y a todo el equipo de *Data Mining* por su ayuda y consejos durante todo este proceso.

A mis profesores de comisión Rodolfo Urrutia y Ricardo San Martín por su interés, ayuda y consejos desde el inicio de este proyecto en el E hasta la entrega final durante el F.

A todos mis amigos de universidad, a quienes he tenido a la suerte de conocer durante estos 7 años en la Escuela. De manera particular, agradecer a Belén y Juan Pablo, con quienes tuve el agrado de trabajar y compartir durante gran parte de la carrera.

A mis amigos del colegio, viejos conocidos con los que he podido compartir unos excelentes y de los más valiosos años de mi vida.

Finalmente, agradecer de manera muy especial a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental sobre el cual he podido construir todos estos años.

Juraj Domic Bouza  
Septiembre, 2013

## Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Antecedentes Generales de Industrias Relevantes.....	1
1.2 Antecedentes Empresa Constructora .....	5
1.3 Motivación .....	5
1.4 Justificación .....	6
1.4.1 Situación Actual Constructora.....	6
1.4.2 Valor del Problema.....	9
1.5 Problema a Resolver .....	10
1.5.1 Objetivo General .....	11
1.5.2 Objetivos Específicos.....	11
1.6 Alcances.....	12
1.7 Metodología .....	13
1.8 Resultados Esperados .....	14
1.9 Organización del Informe .....	14
Capítulo 2: Marco Conceptual.....	15
2.1 Conceptos de Interés .....	15
2.2 Equipos Utilizados .....	16
2.3 Modelos de Minería de Datos.....	17
2.4 Medidas de Desempeño .....	17
Capítulo 3: Procesamiento de Datos.....	19
3.1 Bases de Datos Disponibles.....	19
3.1.1 Resumen Familia .....	19
3.1.2 Intervenciones 2012.....	19
3.1.3 Otros.....	20
3.2 Equipos Críticos .....	21
3.3 Caracterización Intervenciones 2012.....	23
3.4 Consolidación de Información.....	25
3.4.1 Limpieza de Resumen Familia .....	25
3.4.2 Intervenciones 2012.....	26
3.4.3 Evaluaciones.....	26
3.5 Base Consolidada .....	26
3.6 Generación de Variables de Interés .....	27
Capítulo 4: Implementación de Modelos Predictivos .....	30
4.1 Análisis Equipos Dumper.....	30
4.1.1 Árbol de Decisión .....	30

4.1.2	Distribuciones de Probabilidad .....	33
4.1.2.1	Test de independencia .....	35
4.2	Análisis Equipos Scoop .....	36
4.2.1	Análisis Descriptivo .....	36
4.2.2	Distribuciones de Probabilidad .....	39
4.2.3	Regresión Logística y Support Vector Machine - Equipos Scoop .....	40
4.3	Análisis Equipos Jumbo .....	42
4.3.1	Distribuciones de Probabilidad .....	42
4.3.2	Árboles de Decisión - Equipos Jumbo .....	42
4.3.3	Análisis Predictivo .....	46
4.4	Análisis Resultados .....	48
Capítulo 5:	Escenarios Operacionales .....	51
5.1	Equipos Dumper .....	51
5.2	Equipos Scoop .....	56
5.3	Equipos Jumbo .....	58
5.4	Análisis Resultados .....	61
Capítulo 6:	Recomendaciones y Trabajos Futuros .....	63
6.1	Recomendaciones .....	63
6.2	Trabajos Futuros.....	64
Capítulo 7:	Conclusiones .....	66
Bibliografía	.....	68
Anexo A:	Glosario de Variables .....	70
Anexo B:	Modelos Predictivos - Equipos Scoop .....	72
B.1	Árbol de Decisión - Equipos Scoop.....	72
B.2	Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Scoop.....	73
Anexo C:	Modelos Predictivos - Equipos Jumbo .....	74
C.1	Árbol de Decisión - Equipos Jumbo .....	74
C.2	Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Jumbo - Primera mitad.....	75
C.2	Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Jumbo - Segunda mitad.....	76
Anexo D:	Tabla Producción vs Horas de Reserva - Equipos Jumbo.....	77

## Índice de Gráficos

Gráfico 1. Evolución índice IMACON (2008 = 100) .....	2
Gráfico 2. Evolución y proyección de consumo mundial de cobre .....	2
Gráfico 3. Evolución de costos por libra producida.....	3
Gráfico 4. Evolución de ley de mineral en Chile (2005=100) .....	4
Gráfico 5. Evolución de insumos críticos de Codelco (2005=100).....	4
Gráfico 6. Número promedio de equipos .....	6
Gráfico 7. Horas de Falla por equipo - Periodo 2012 .....	7
Gráfico 8. Consumo de repuestos y servicios de reparación 2012.....	8
Gráfico 9. Test de tendencia - Equipos Dumper .....	35
Gráfico 10. Test de correlación - Equipos Dumper .....	36
Gráfico 11. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Dumper .....	53
Gráfico 12. Relación mantenimiento correctivo y preventivo - Equipos Dumper .....	54
Gráfico 13. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Scoop .....	57
Gráfico 14. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Jumbo.....	59

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Árbol de Decisión - Equipo Dumper.....	31
Ilustración 2. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Dumper .....	32
Ilustración 3. Ajuste de Distribuciones - Equipos Dumper .....	34
Ilustración 4. Árbol de Decisión - Equipo Scoop .....	37
Ilustración 5. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Scoop.....	38
Ilustración 6. Ajuste de Distribuciones - Equipos Scoop .....	39
Ilustración 7. Árbol de Decisión - Equipo Jumbo .....	43
Ilustración 8. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Jumbo .....	44
Ilustración 9. Esquema de análisis - Equipos Dumper .....	51

## Índice de Tablas

Tabla 1. Producción y participación del PIB 2012.....	1
Tabla 2. Disponibilidad de equipos y semanas bajo el límite requerido .....	8
Tabla 3. Costo de oportunidad por horas sin operación por equipo .....	9
Tabla 4. Participación del equipo en el valor total de flota.....	21
Tabla 5. Consumo promedio mensual en repuestos (Base = Perforación Avance).....	22
Tabla 6. Horas de falla por equipo.....	22
Tabla 7. Detalle de pautas realizadas en los equipos .....	23
Tabla 8. Distribución de intervenciones por tipo de equipo .....	23
Tabla 9. Días promedio entre tipos de intervenciones .....	24
Tabla 10. Intervalos promedio entre mantenciones preventivas .....	24
Tabla 11. Detalle de costo y duración de mantenciones .....	25
Tabla 12. Detalle de registros por tipo de equipo.....	27
Tabla 13. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Dumper .....	31
Tabla 14. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipo Dumper.....	33
Tabla 15. Medidas de desempeño - Equipos Dumper .....	35
Tabla 16. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Scoop .....	37
Tabla 17. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipos Scoop.....	38
Tabla 18. Medidas de desempeño - Equipos Scoop .....	40
Tabla 19. Variables seleccionadas Regresión Logística - Equipos Scoop .....	41
Tabla 20. Códigos de variables - Regresión Logística- Equipos Scoop.....	41
Tabla 21. Distribuciones de probabilidad - Equipos Jumbo.....	42
Tabla 22. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Scoop .....	43
Tabla 23. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipos Scoop.....	45
Tabla 24. Medidas de desempeño - Equipos Jumbo .....	46
Tabla 25. Variables seleccionadas Regresión Logística - Equipos Jumbo.....	47
Tabla 26. Códigos de variables - Regresión Logística - Equipos Jumbo .....	47
Tabla 27. Resumen de indicador <i>F-measure</i> para modelos predictivos .....	48
Tabla 28. Resumen de indicador de precisión para modelos predictivos .....	49
Tabla 29. Resumen de indicador de <i>recall</i> para modelos predictivos.....	50
Tabla 30. Parámetros simulación - Equipo Dumper .....	52
Tabla 31. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Dumper .....	55
Tabla 32. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Scoop .....	57
Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Jumbo .....	59
Tabla 34. Matriz de probabilidades - Metros semana anterior y horas de reserva.....	60
Tabla 35. Matriz de probabilidades - Horas efectivas semana anterior y horas de reserva.....	61
Tabla 36. Resumen intervalos entre mantención preventiva .....	61

## Capítulo 1: Introducción

A pesar de los avances tecnológicos, el mantenimiento de equipos en operaciones mineras, y en obras de construcción en general, continúa siendo un desafío mayor dentro de la industria a nivel mundial [1]. Para el caso de la minería subterránea de carbón en Australia, cerca del 10% del tiempo productivo se destina a labores de mantenimiento no planificado [1]. Los factores que pueden influir en las fallas son numerosos. El desgaste de los equipos productivos, errores durante la operación de equipos, la habilidad del mecánico frente a una reparación, etc. pueden tener distintos efectos en la ocurrencia de detenciones.

En este capítulo se revisan antecedentes de las industrias relevantes y de una empresa proveedora especializada en servicios de construcción en minería. A partir del contexto de mercado, se entrega el detalle del trabajo a realizar, motivación, justificación, objetivos principales y alcances del proyecto.

### 1.1 Antecedentes Generales de Industrias Relevantes

Las industrias de minería y construcción han logrado posicionarse como motores importantes del PIB chileno, ubicándose en el primer y sexto lugar respectivamente durante el año 2012. Durante este año, ambas industrias logran captar cerca del 21% del Producto Interno Bruto total del país.

**Tabla 1. Producción y participación del PIB 2012**

Actividad	Producción (MM \$US)	Participación del PIB
Minería	27,000	13.2%
Construcción	15,900	7.7%

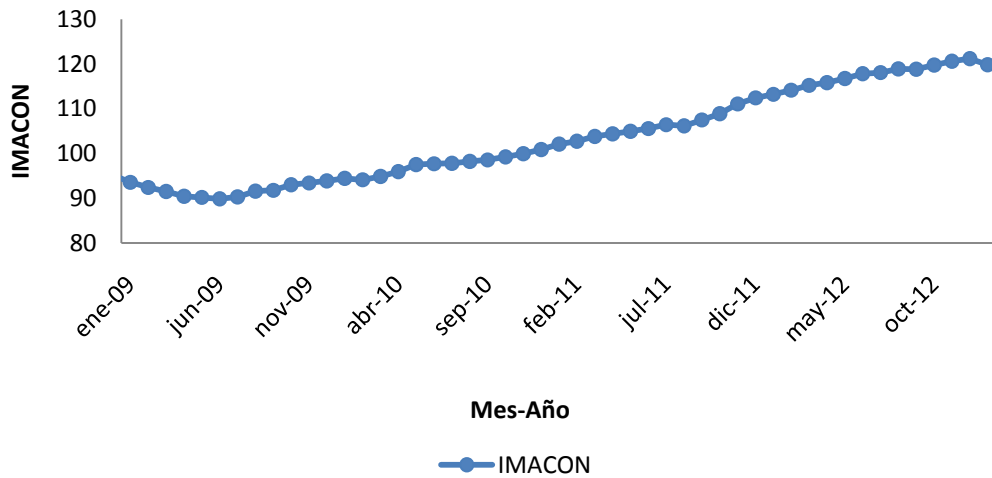
Fuente: Elaboración propia a partir de registros del Banco Central [2]

El caso particular de la minería es sumamente relevante. Codelco, la principal productora de cobre en el mundo, ha realizado un aporte al estado chileno de US\$ 107 mil millones de dólares desde el año 1971 [3], aporte que ha permitido el financiamiento y desarrollo de políticas de gobierno.

Además de contar con una participación actual importante en el producto interno, indicadores y proyecciones de consumo muestran expectativas interesantes para estas industrias en el corto y mediano plazo.



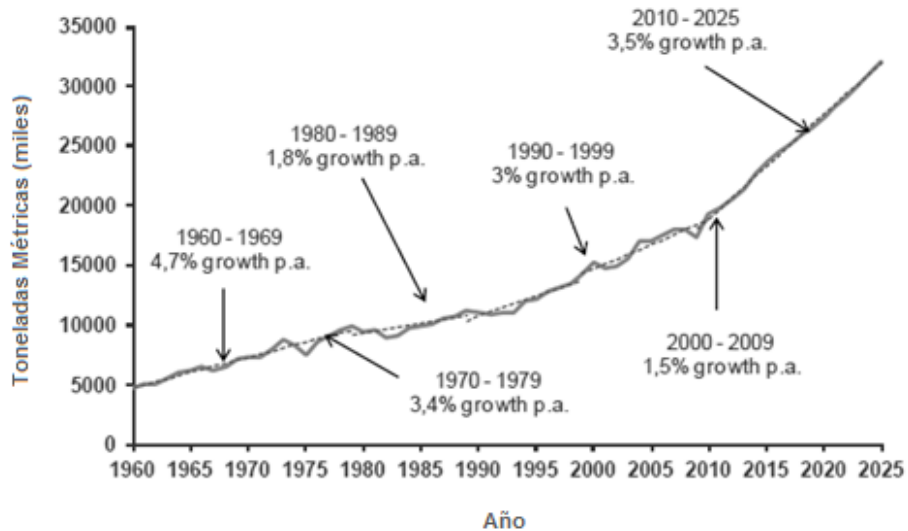
**Gráfico 1. Evolución índice IMACON (2008 = 100)**



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IMACON [4]

Para el caso de la construcción, se observa un alza sostenida del Índice Mensual de Actividad de Construcción (IMACON) a partir de junio del año 2009. Tendencia que da cuenta de una industria en crecimiento y dinamismo, características que debiesen mantenerse en el corto plazo.

**Gráfico 2. Evolución y proyección de consumo mundial de cobre**

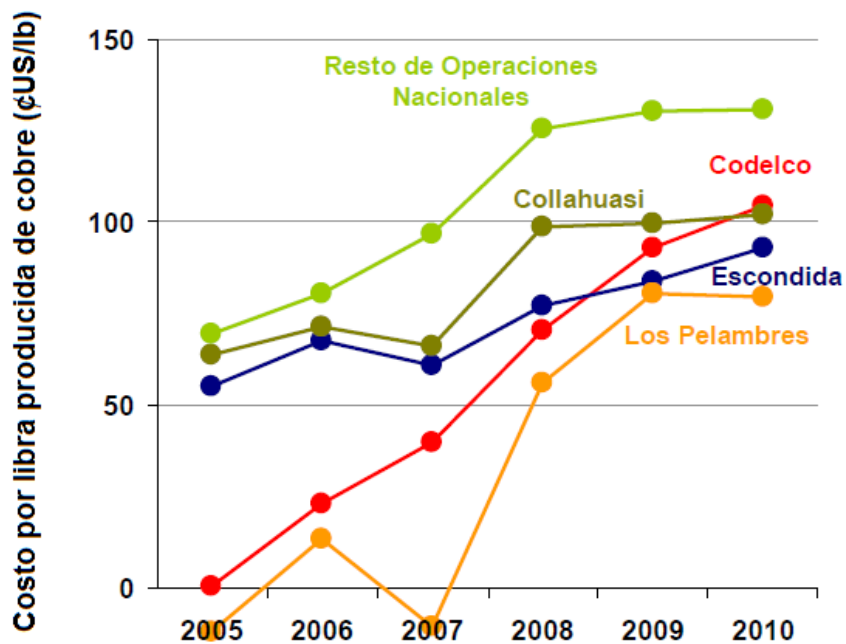


Fuente: Informe Tendencias del Mercado del Cobre [5]

Para el caso del cobre se observan excelentes proyecciones de consumo de cobre en el corto y mediano plazo. La demanda China por un lado y el crecimiento esperado de la economía India, provoca que las estimaciones de consumo de cobre se mantengan crecientes a partir del año 2011. Estas expectativas se ratificaron en parte durante el año 2012 con los montos de inversión esperados. Considerando la industria chilena de minería de cobre y oro, cerca de US\$ 100.000 millones en inversión fueron estimados en proyectos futuros [6]. Actualmente una porción importante de este monto se encuentra paralizado, reduciendo la inversión esperada a US\$ 35 mil millones [7]. A pesar de este escenario adverso, considerando que alrededor del 45% de los costos de proyecto se destinan a actividades de construcción [8], son cerca US\$16 mil millones en proyectos potenciales para proveedores especializados en construcción.

Si bien el alza de costos es un fenómeno a nivel mundial, en Chile se observa un efecto particularmente fuerte, provocando la paralización o retraso de una porción importante de los montos de inversión, debilitando la competitividad de la industria minera nacional.

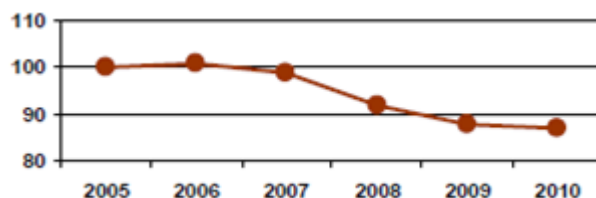
**Gráfico 3. Evolución de costos por libra producida**



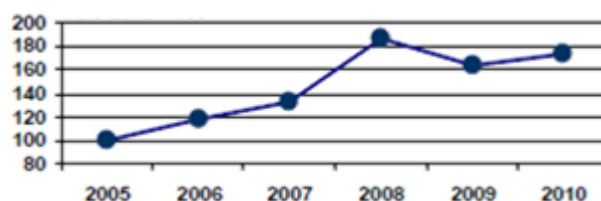
Fuente: Conferencia programa proveedores de clase mundial en la minería [9]

El alza de precios de la energía ha sido un factor crítico en los últimos años. Si el 2002 la energía representaba en promedio un 11% de los costos, este año representa un 20%. A esta situación se suma una baja en las leyes promedios de extracción y un aumento del precio insumos críticos de Codelco, entre ellos la energía.

**Gráfico 4. Evolución de ley de mineral en Chile (2005=100)**



**Gráfico 5. Evolución de insumos críticos de Codelco (2005=100)**



Fuente: Conferencia programa proveedores de clase mundial en la minería [9]

Si a esto sumamos la explotación cada vez más profunda de los yacimientos subterráneos, que obliga a trabajar con roca primaria de mayor dureza, tenemos un escenario desafiante para los equipos extractivos. Al trabajar con menores leyes, los equipos deben extraer mayor cantidad de material para extraer la misma cantidad de cobre.

Estos factores se traducen en una pérdida progresiva de competitividad de la industria minera chilena. El panorama desde diciembre del año 2012, donde se anuncian 100 mil millones de dólares de inversión para el año 2022 [10], ha cambiado radicalmente en las últimas semanas. Ante este escenario Thomas Keller, presidente ejecutivo de Codelco, anuncia: “Hoy día con suerte vamos a llegar a los US\$ 35 mil millones en 2022” [7]. A pesar de esta situación, la venta promedio de proveedores mineros han aumentado un 12% [11]. Esto se explica por la existencia de contratos vigentes en las operaciones actuales. Es más, un aumento de los costos puede incentivar a las empresas a profundizar la externalización de servicios en sus obras, mejorando las condiciones actuales de mercado [11]. Sin importar el escenario, la empresa proveedora se verá beneficiada en la medida que potencia sus niveles de servicio.

## **1.2 Antecedentes Empresa Constructora**

Una empresa constructora relevante en el mercado local destaca por ofrecer servicios especializados de construcción, los cuales incluyen tanto obras energéticas como el desarrollo de obras subterráneas. Corresponde a una empresa de gran tamaño, con más de 1,000 trabajadores y un nivel de facturación por sobre los 50 millones de dólares anuales, lo cual le permite competir con empresas nacionales e internacionales establecidas [8].

En el caso de obras subterráneas mantiene actualmente 2 contratos de construcción importantes para una empresa de la gran minería. Estos trabajos incluyen la construcción y habilitación de niveles productivos, que permitan a la empresa contratante comenzar con la extracción de mineral con su flota propia de equipos.

El desarrollo de estos proyectos se basan en la construcción mediante tronadura de roca, la cual requiere el trabajo conjunto de una serie de equipos productivos como perforadoras de avance, grúas, palas, camiones de bajo perfil, entre otros. Los equipos deben ser proporcionados por la unidad de máquinas de la empresa, encargada de su control, gestión y mantención.

La unidad de máquinas se compone por más de 60 trabajadores, que incluyen operarios, mecánicos, supervisores y administrativos, durante el año 2012 mantiene en promedio 12 mecánicos en 3 talleres de reparación<sup>1</sup>. Esta unidad es la encargada de administrar cerca de 240 equipos propios y arrendados de la compañía. Por este motivo, la unidad pasa a ser en algunos casos el intermediario entre las empresas proveedoras de equipos y la unidad productiva de la empresa. Además de proporcionar equipos a las distintas obras internas, la unidad ofrece servicios de reparación y arriendo a operaciones externas. Finalmente, cabe destacar que la principal función de la unidad es proporcionar y reparar los equipos solicitados, quedando a disposición del área de operaciones su manejo y planificación.

## **1.3 Motivación**

El estudio nace a partir de la inquietud de la unidad de máquinas por definir intervalos de mantenimiento preventivo en sus equipos productivos. Específicamente, se busca evaluar el impacto de una política de mantenimiento en la disponibilidad física de los equipos, buscando potenciar la productividad de la flota.

Un aumento de la productividad no solo trae beneficios directos en los ingresos de la unidad, sino que también puede reducir el número de equipos requerido en obra, liberando maquinaria para otras actividades, por ejemplo, el arriendo en empresas mineras externas.

Si bien la empresa se encuentra dispuesta a aumentar los gastos de mantenimiento para potenciar la productividad de la flota, el estudio debe considerar el gasto requerido para realizar un crecimiento económicamente viable.

---

<sup>1</sup> Este número no considera encargados de bodega o supervisores

## 1.4 Justificación

La primera gran justificación corresponde a los antecedentes entregados en el punto 1.1. Dada la importancia de la minería para la economía nacional y el alza sostenida de costos, cobra interés la búsqueda de eficiencias en una industria estratégica.

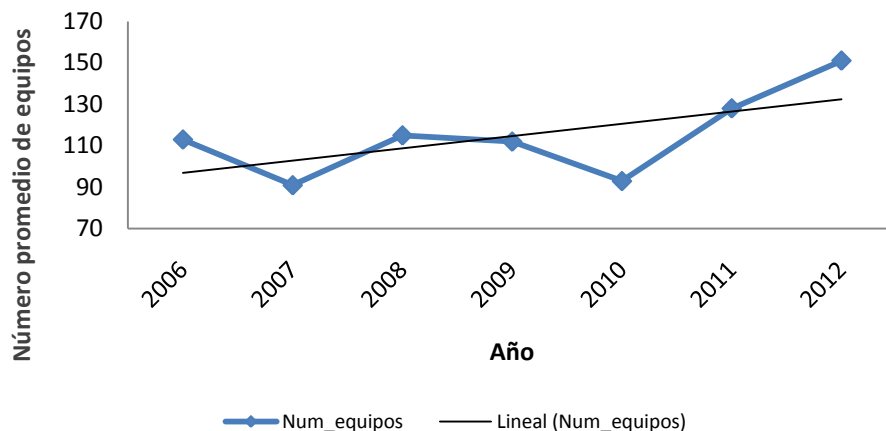
A esto se suma la situación actual de la empresa constructora y el valor estimado del problema en estudio. En el primer caso, se observa un aumento de las horas de falla por equipo, aumento de gastos en reparaciones y períodos de disponibilidad por debajo del mínimo requerido. Para el caso del valor del problema se realiza una estimación del problema en base a costos de repuestos, reparaciones, horas no productivas y salarios, determinando un valor total del problema en estudio.

### 1.4.1 Situación Actual Constructora

De acuerdo a la unidad de máquinas, la empresa constructora es vista desde la competencia como una empresa establecida y ordenada. Cerca del 25% del presupuesto anual se destina a labores de reparaciones, en una relación 70-30 entre mantenimiento correctivo y preventivo.

Los últimos años se observa un crecimiento importante de la empresa, reflejado en el número promedio de equipos por año. Este aumento coincide con la incorporación de nuevos proyectos de construcción.

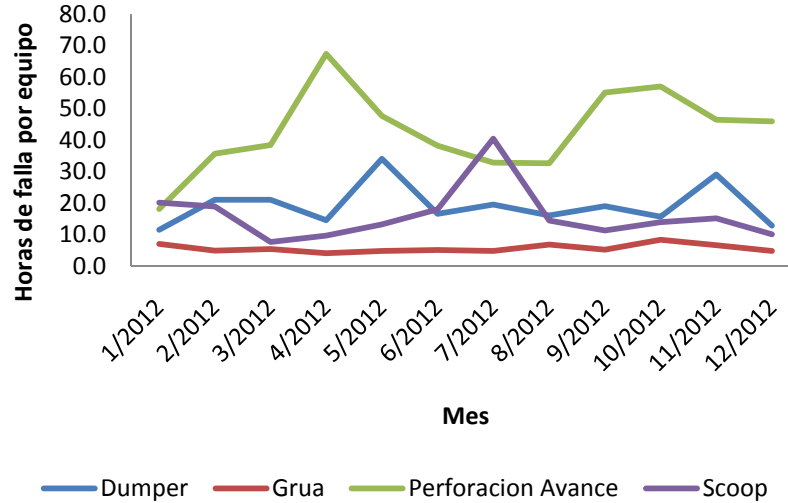
**Gráfico 6. Número promedio de equipos**



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo de repuestos

Un aumento del número de equipos provoca que la gestión y operación de la unidad de máquinas sea cada año de mayor complejidad, fenómeno que puede explicar en parte los efectos observados sobre las horas de falla y consumo de repuestos por equipo.

**Gráfico 7. Horas de Falla por equipo - Periodo 2012**

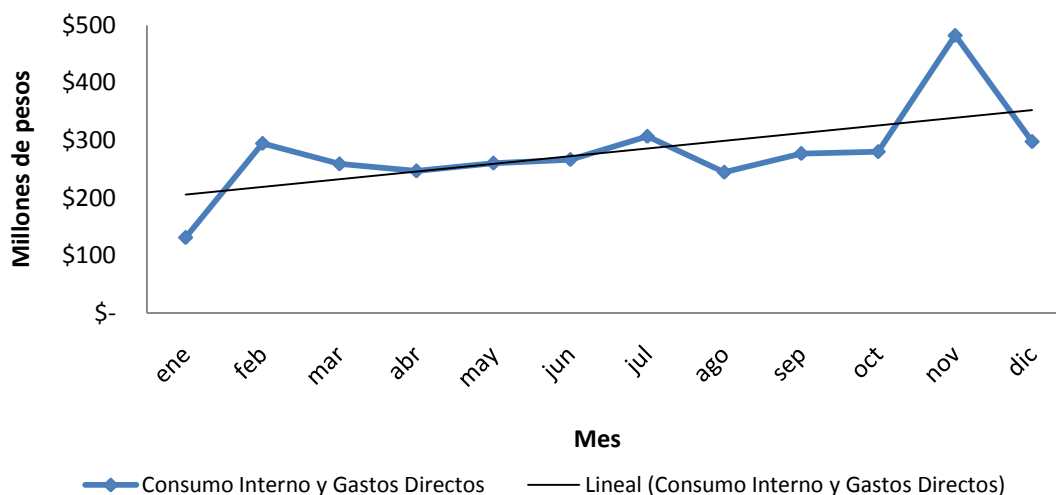


Fuente: Elaboración propia a partir de registros operacionales

En base a las horas de falla registradas durante el año 2012 se observa una leve predominancia de la maquinaria de perforación de avance, superando al resto de los equipos. Además de mostrar altos períodos de falla, este equipo presenta una fuerte tendencia al alza, pasando de 20 a cerca de 50 horas de falla por equipo durante el año 2012. La predominancia de los equipos de perforación se explica en parte por la intensidad de trabajo a la que se someten durante la operación. Estos equipos presentan un aumento de las horas de falla por equipo, síntoma de un posible desgaste o un programa de reparación de bajo impacto. Los equipos *dumper* y *scoop* presentan menores horas de falla por equipo, además de una variabilidad importante, con *peaks* en meses particulares.

Un fenómeno similar se observa en el gasto de reparaciones de los equipos, observándose un aumento del consumo de repuestos y servicios de reparación a lo largo del año 2012.

**Gráfico 8. Consumo de repuestos y servicios de reparación 2012**



Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo

La disponibilidad física de los equipos también corresponde a una variable de desempeño crítica. Por un lado es una medida directa de la calidad de servicio entregada al cliente, como también es parte fundamental de los contratos de operación. El proveedor es evaluado en base a la disponibilidad de los equipos operados, siendo el 85% el límite promedio acordado.

**Tabla 2. Disponibilidad de equipos y semanas bajo el límite requerido**

Disponibilidad	Semanas bajo 85%	Promedio 2012
Dumper	5	94%
Grúa	0	98%
Mini Cargador	3	96%
Perforación Avance	15	87%
Retro Excavadora	4	92%
Roboshot	0	95%
Scoop	1	95%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros operacionales

A partir de los registros de disponibilidad se observan períodos en que la empresa se encuentra por debajo del mínimo acordado. Resulta interesante estudiar el comportamiento de este indicador frente a un aumento del mantenimiento preventivo, especialmente en los equipos de perforación, que durante el año 2012 presentaron un promedio de 87% de disponibilidad.

A partir de los registros disponibles se observa un crecimiento importante de la empresa los últimos años, provocando que la gestión de la unidad de máquinas aumente en complejidad. Este crecimiento puede explicar el alza de las horas de falla y gasto en repuestos, los cuales sufrieron un aumento sostenido durante el 2012. En el caso de la disponibilidad, si bien la empresa mantiene promedios por sobre el mínimo requerido, ésta debe estar preparada en caso que el crecimiento se mantenga o potencie en el mediano plazo.

### 1.4.2 Valor del Problema

A partir de los registros disponibles se estima el valor del mantenimiento dentro de una operación subterránea de la compañía. Este valor se compone de 3 montos: Estimación del ingreso no percibido, gastos de mantenimiento en equipos y el gasto de mano de obra en los talleres.

Considerando las horas de falla detenidas y sus tarifas de operación podemos estimar el costo por no operar de cada equipo. El cálculo fue realizado en base al costo variable, el cual depende del tipo de equipo en cuestión. Equipos como palas o camiones tienen un cobro por hora de trabajo, mientras que las máquinas de perforación tienen un cobro por metro perforado. En el caso de equipos con cobros fijos mensuales, se realiza una estimación de las horas efectivas promedio mensual trabajadas, con tal de transformar el cobro mensual a un cobro por hora de trabajo promedio.

**Tabla 3. Costo de oportunidad por horas sin operación por equipo**

Rótulos de fila	Monto perdido estimado 2012
Perforación Avance	US\$ 204,000
Scoop	US\$ 94,000
Retroexcavadora	US\$ 36,000
Dumper	US\$ 24,000
Grúa	US\$ 36,000

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo



Bajo el supuesto que todas las horas de reparaciones pueden ser potenciales horas de trabajo, la unidad de máquina deja de captar por concepto de detención de sus equipos cerca de US\$400,000. Aun cuando difícilmente se logra eliminar por completo las horas de detención de los equipos, este ejercicio permite obtener un valor estimado del costo de oportunidad de detención.

Para determinar los montos de repuestos y servicios de reparación, se realiza una sumatoria de los gastos para cada uno de los códigos de equipos asignados a la obra de interés durante el año 2012.

El último componente considerado corresponde a los gastos de mano de obra. Considerando solo los sueldos de mecánicos, ayudantes de mecánicos y supervisores de mantenimiento, se obtiene un monto total de gasto en sueldos en actividades de reparación. Considerando la existencia de 3 talleres operacionales, incluyendo el taller de interés, podemos obtener un gasto promedio anual de mano de obra destinada a reparación para la operación en estudio. Este monto, sumado con los montos de repuestos, totaliza cerca de US\$ 1.6 millones.

Considerando todos los costos estimados, el valor del problema para la obra en estudio corresponde a cerca de US\$ 2 millones. Dado que un porcentaje importante de este monto corresponde a la reparación de equipos, puede resultar interesante eficiencias potenciales sobre este gasto. Considerando que la empresa destina alrededor del 70% de su presupuesto a labores de mantenimiento correctivo, y que una política de mantenimiento preventivo puede traducirse en ahorros entre 12% y 18% [12] sobre el costo de mantenimiento, una política puede traducirse en ahorros potenciales de US\$ 168,000 anuales. Si bien es la disponibilidad y no el ahorro de costos el principal interés de la empresa, cobra interés alcanzar niveles de disponibilidad de equipos al menor costo posible.

## **1.5 Problema a Resolver**

El proceso de construcción subterráneo se caracteriza por la intervención de distintos tipos de equipos, los cuales sufren desperfectos durante sus jornadas de trabajo. Un aumento del número de fallas tiene dos grandes consecuencias: Aumenta los costos de reparación correctiva de los equipos y disminuye las horas en que el equipo se encuentra disponible para operar. Por estas razones cobra interés determinar las condiciones en que un equipo es propenso a fallar durante un turno y cómo, mediante la aplicación de mantenimiento preventivo, se pueden reducir costos de reparación o bien potenciar la disponibilidad de máquinas. Este análisis se realiza sobre una obra de interés de la compañía, en base a la disponibilidad de información e interés de la empresa constructora. Para efectos del informe, la operación minera se denomina simplemente “obra” u “operación”, sin hacer referencia a su nombre original.

### **1.5.1 Objetivo General**

El objetivo principal del proyecto corresponde al estudio del impacto del mantenimiento preventivo en la disponibilidad de equipos en una operación minera subterránea, considerando el efecto sobre los costos de reparación. Para lograr este objetivo fueron propuestos una serie de objetivos específicos, desarrollados durante el proyecto.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Determinar factores que influyen en la falla de equipos

A partir de un análisis de registros de intervenciones y producción, se deben determinar las principales causas que influyen y determinan la falla de equipos. La importancia de este resultado radica en su potencial de aplicación. Identificando los factores críticos es posible orientar inversiones o proyectos que permitan una operación eficiente. Junto a ello, es posible conformar un sistema de alerta temprana, permitiendo la planificación de los trabajos de reparación.

- Determinar probabilidad de falla de equipos

Por medio de distribuciones de probabilidad y modelos de minería de datos, se determina la probabilidad de falla de los equipos bajo distintos niveles de producción. Con esta probabilidad de falla se determina la confiabilidad y disponibilidad esperada del equipo para distintos escenarios operacionales.

- Diseñar pauta de mantenimiento óptima

A partir de los modelos con mayor poder predictivo, determinar una pauta de mantenimiento que permita maximizar el beneficio esperado del equipo, sujeto al cumplimiento del límite de disponibilidad física. Este objetivo supone a priori la significancia de las variables de mantenimiento en la ocurrencia de fallas. En caso contrario se deben buscar soluciones alternativas, como límites máximos de trabajo para los equipos.

- Entregar recomendaciones finales

Tiene relación con recomendaciones o sugerencias que puedan surgir a lo largo del trabajo realizado. Lineamientos generales que permitan a la empresa constructora enfocar sus esfuerzos para la mejora en el desempeño de sus equipos.

## 1.6 Alcances

El problema a resolver puede alcanzar tamaños excesivos si consideramos el número de operaciones, número de equipos y tipos de equipos involucrados en las labores de construcción. Por esta razón, se tienen los siguientes alcances del proyecto a realizar.

- Análisis sobre una operación minera

Si bien se cuentan con registros de las 2 operaciones actuales de la empresa constructora, dado los plazos para el desarrollo del trabajo de título, solo se trabaja con una obra de interés. De esta forma se reducen los factores externos que pueden influir en la ocurrencia de fallas, como profundidad de la operación minera, tipo de roca, metodologías de trabajo propias de cada operación minera, entre otras. La obra seleccionada se determina a partir del mayor número de registros disponibles para el análisis y el interés de la unidad de máquinas por desarrollar la investigación en una obra actual.

- Investigación de equipos críticos

Si bien la empresa constructora cuenta con un número importante de tipos de equipos involucrados en la operación, el estudio se enfoca solo en los de mayor importancia. Esto se determina a partir del valor de los equipos en comparación con el valor de flota, el gasto de los equipos en repuestos y servicios de reparación, horas de falla promedio observadas y la estimación del costo por hora no producida. En base a los criterios mencionados, se seleccionan los equipos de perforación de avance, palas y camiones de bajo perfil. El capítulo 3.2 presenta en detalle los cálculos y estimaciones realizadas para cada tipo de equipo.

- Registros técnicos de equipos no disponibles

Registros técnicos de los equipos como temperatura, aceite y vibraciones no se consideran en el proyecto, dado que son utilizados por los proveedores de los equipos. La principal fuente de información corresponde a los registros operacionales e intervenciones de la unidad de máquinas, como también las evaluaciones de operarios.

- Trabajo de título no considera la aplicación de resultados

Más que un proyecto aplicado, el trabajo de título corresponde a un estudio inicial para futuros proyectos. A partir de los resultados obtenidos, la memoria desarrollada puede convertirse o no en una propuesta de interés para la empresa constructora.

## 1.7 Metodología

La metodología determinada para el proyecto de título sigue una estructura de procesos de *Knowledge Discovery in Databases* o KDD, dividiéndose en tres grandes etapas.

### - Procesamiento de Datos

En esta etapa se realiza una recopilación de las bases de datos disponibles para la operación de interés. Las bases de datos principales que requieren procesamiento son: Resumen Familia, la cual contiene la información operacional de los equipos agrupadas por turno de trabajo, y el archivo de Intervenciones 2012, que contiene el detalle de trabajos realizados a cada una de las máquinas.

Una vez consolidadas las bases, limpiar *outliers* y analizar valores o registros perdidos, para finalmente definir los registros de interés que continuarán en el proceso. La selección se realiza en base a un límite de registros perdidos por semana.

### - Modelos Predictivos

Una vez definidos los registros operacionales a utilizar se implementan modelos que permitan predecir la ocurrencia de fallas. En una primera instancia, se implementan árboles de decisión para determinar las condiciones operacionales que permiten identificar los registros con fallas. Terminado este análisis, se busca el ajuste de distribuciones de probabilidad a las horas efectivas de operación entre intervenciones correctivas. En caso de no existir ajuste, se procede a la implementación de modelos de minería de datos. A partir de medidas de desempeño, se determina el modelo predictivo que permita maximizar los indicadores de interés.

### - Optimización

La etapa de optimización depende del modelo predictivo seleccionado. En caso que las horas efectivas entre fallas presenten un ajuste significativo de distribuciones de probabilidad, se obtiene mediante simulación el beneficio y disponibilidad esperados para un intervalo de trabajo entre actividades preventivas. La variable de decisión pasa a ser el intervalo de trabajo entre actividades de mantenimiento.

En caso que no exista ajuste de distribuciones se identifican, de acuerdo al modelo predictivo seleccionado, un intervalo eficiente entre intervenciones preventivas o bien límites máximos de trabajo de los equipos. El resultado depende de las variables seleccionadas por el algoritmo predictivo.

## **1.8 Resultados Esperados**

Los principales resultados esperados son dos. El primer resultado es a nivel operacional y corresponde a la elaboración de modelos predictivos para los equipos de interés, que permitan la predicción de intervenciones correctivas futuras. De esta forma es posible levantar alertas tempranas de los equipos que presentan probabilidades de falla elevadas, permitiendo la planificación de tareas de reparación o bien el retiro anticipado del equipo de los frentes productivos. En relación a las variables que componen los modelos, se espera que un aumento de la producción, un bajo desempeño en evaluaciones, un mayor tiempo desde la última mantención preventiva o la antigüedad del equipo, aumenten la probabilidad de falla.

El segundo resultado tiene un efecto a nivel táctico. Por medio de modelos predictivos, se espera determinar intervalos eficientes de mantenimiento preventivo para los equipos de interés. De esta forma, potenciar la productividad de los equipos o bien mantener la disponibilidad actual a menores niveles de costo. A partir de entrevistas realizadas en la empresa constructora, se espera que los resultados tiendan a la reducción de los intervalos de mantenimiento preventivo. En principio esto se explica por una priorización de tareas productivas en desmedro de las horas de mantención.

## **1.9 Organización del Informe**

El resto del informe se divide en las siguientes secciones. El segundo capítulo presenta un breve marco conceptual con herramientas y conceptos utilizados a lo largo de informe. El capítulo 3 detalla el procesamiento de datos a partir de los registros iniciales, detallando la consolidación y transformación de variables de interés para los modelos predictivos. El cuarto capítulo entrega los resultados de los modelos predictivos para cada uno de los equipos de interés. A partir de los modelos predictivos de minería de datos, se identifican las condiciones que favorecen la ocurrencia de fallas, realizando una comparación y selección de los modelos para la posterior optimización. El quinto capítulo detalla el análisis de niveles de producción, de acuerdo a los modelos seleccionados: Horas efectivas de trabajo para los camiones de bajo perfil, metros perforados para el caso de los equipos de perforación y número de paladas para los equipos de carga. El sexto capítulo entrega recomendaciones para la empresa constructora y posibilidad de nuevas líneas de trabajo. Finalmente, el séptimo capítulo resume los principales resultados y conclusiones del trabajo realizado.

## Capítulo 2: Marco Conceptual

En este capítulo se presenta conceptos relevantes que serán utilizados en las siguientes secciones del informe. Se hace referencia a la nomenclatura utilizada en los reportes operacionales, especialmente en la clasificación de las horas de trabajo de un equipo productivo.

### 2.1 Conceptos de Interés

- Horas efectivas (HE). Tiempo en que el equipo se encuentra realizando labores de producción efectiva o bien se encuentra en camino a labores de producción.
- Horas de reserva (HR). Tiempo en que un equipo se encuentra disponible para operar pero no es requerido por producción.
- Pérdida Operacional (PO). Tiempo en que un equipo se encuentra asignado a un operador para producción, pero por motivos ajenos al equipo no es capaz de realizar sus labores productivas. Este motivos incluyen la pérdida de conexión de corriente o agua, espera por frente de avance, entre otros.
- Horas de mantenimiento (HM). Corresponde al tiempo en que un equipo permanece en el taller debido a reparaciones correctivas o preventivas.
- Disponibilidad Física. Corresponde a un indicador de desempeño de los equipos, el cual refleja la proporción de tiempo en que el equipo se encuentra disponible para operar. Su cálculo es el siguiente:

$$\text{Disponibilidad Física} = \frac{HE + HR + PO}{HE + PO + HR + HM}$$

- Horómetro. Corresponde al medidor de consumo eléctrico de los equipos.
- Mantenimiento Correctivo. Corresponde a la reparación no planificada del equipo.
- Mantenimiento Preventivo. Corresponde al reemplazo de componentes de acuerdo a un plazo establecido, ya sea por especificaciones del proveedor o por protocolos internos. Si bien supone el reemplazo de componente antes del término de su vida útil, un cambio planificado presenta generalmente menores costos que los de una intervención imprevista.
- Mantenimiento Predictivo. Corresponde al monitoreo de variables de interés de los equipos, con tal de realizar reemplazos una vez que se detecten patrones que indiquen una falla próxima de un componente particular. En la industria son utilizados el análisis de aceite, vibraciones, temperatura, entre otros.

## 2.2 Equipos Utilizados

A partir del registro de intervenciones, se identifican los equipos utilizados por la empresa constructora en su operación de interés. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

- Perforación Avance / *Jumbo*

Corresponde a un equipo móvil subterráneo, el cual mediante perforadoras hidráulicas montadas en brazos es capaz de realizar distintas perforaciones en la roca. Estas perforaciones pueden ser rellenas con explosivos para realizar un avance mediante detonaciones o bien para reforzar el frente de avances con pernos.

- Pala de bajo perfil / LHD / *Scoop*

De las siglas en inglés *Load Haul and Dump*, corresponde a una pala de bajo perfil para el carguío o transporte de mineral, la cual puede tener una capacidad de 13 yardas cúbicas. Sus articulaciones permiten su movimiento a través de pasajes subterráneos estrechos, maximizando su eficiencia en distancias menores a 300 metros [13].

- Camión minero / *Dumper*

Corresponde a un camión de bajo perfil, diseñado para transportar grandes volúmenes de materia, manteniendo un perfil reducido para facilitar el ingreso a operaciones subterráneas. Pueden ser equipos diesel o eléctricos y su vida útil típica es de 5 años [14].

- *Roboshot*

Corresponde a un equipo móvil eléctrico o diesel articulado que permite reforzar túneles subterráneos con concreto en forma de *spray*. Por medio de mallas metálicas el concreto refuerza paredes, pudiendo actuar en conjunto con pernos de refuerzo.

- Equipos de Levante / Grúas

Las grúas permiten el trabajo en altura dentro de la operación minera. Dentro de sus trabajos realizados destacan la fortificación de los frentes de trabajo y la carga de explosivos para tronadura de los frentes de avance.

## 2.3 Modelos de Minería de Datos

El uso de modelos predictivos de minería de datos tiene distintas aplicaciones en la actualidad, como por ejemplo el sector bancario. Un análisis mediante *data mining* permite identificar anticipadamente clientes con riesgo de no pago o *default*, permitiendo mejorar las políticas de crédito de la empresa financiera. En el caso particular de un análisis supervisado, una base de datos previamente clasificados puede ser ingresada para el aprendizaje de algoritmos. Dividiendo la base de datos en calibración, testeo y prueba es posible conformar un modelo que permita la predicción de eventos futuros.

Para el caso particular del proyecto desarrollado, la empresa constructora cuenta con registros operacionales de sus equipos mineros, desde sus horas de trabajo hasta las intervenciones realizadas. Con esta información es posible implementar modelos predictivos de clasificación, que permitan identificar y predecir intervenciones correctivas futuras. Dada la naturaleza del problema, en donde un equipo puede encontrarse en estado “falla” o “no falla”, es posible la aplicación de modelos predictivos que permitan identificar intervenciones correctivas futuras. Un estado de falla se define a partir de la intervención correctiva de acuerdo a los registros del mecánico.

Los modelos predictivos seleccionados corresponden a árboles de decisión, regresión logística y *support vector machine*. Estos tres modelos buscan clasificar los registros de acuerdo a sus propios algoritmos. Para comparar el desempeño de cada uno de los modelos, se define un *threshold* de 0.25. Este valor fija el límite de probabilidad en que un registro es clasificado como una jornada con presencia de falla.

## 2.4 Medidas de Desempeño

Comparar las herramientas de minería de datos es vital para escoger el modelo que mejor prediga las fallas. Si bien existen una serie de indicadores para medir el desempeño de un algoritmo predictivo, el estudio se enfoca en la precisión y *recall*. La precisión permite evaluar el desempeño del modelo considerando únicamente las predicciones realizadas correctamente algoritmo, mientras que el *recall* evalúa cuántos de estos registros fueron detectados por el modelo del total de la base. Estos dos indicadores deben ser considerados al momento de evaluar un modelo predictivo, puesto que por sí solos pueden inducir a errores. Suponiendo un registro de 100 fallas, o intervenciones correctivas, un modelo puede predecir correctamente un solo evento. De esta forma se obtiene una precisión del 100%, dado que acierta en todas las predicciones realizadas, mientras que el *recall* será tan solo de un 1%.

Por esta razón se incluye en el análisis el indicador F1 o F-measure, el cual combina precisión y *recall* mediante una media armónica y permite obtener una evaluación completa del modelo predictivo implementado.



Las fórmulas de los indicadores utilizados son las siguientes.

$$\text{precisión} = \frac{TP}{TP+FP} \quad \text{recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad F1 = \frac{2 \times \text{precision} \times \text{recall}}{(\text{precision} + \text{recall})}$$

Donde 'TP' corresponde a *True Positives*, o una predicción afirmativa que finalmente fue verdadera, 'FP' corresponde a *False Positive* o predicciones afirmativas realizadas incorrectamente y 'FN' corresponde a *False Negatives* o predicciones negativas realizadas incorrectamente.

## Capítulo 3: Procesamiento de Datos

Corresponde a la primera etapa del proyecto desarrollado. Comienza con una descripción de las bases de datos disponibles. Posteriormente se presenta un análisis de los equipos que mantienen registros operacionales, de forma de determinar los equipos críticos para la empresa constructora. Luego, se entrega una descripción de los registros de intervenciones, proporción de intervenciones preventivas y correctivas, duración promedio, etc. Finalmente, se detalla el procesamiento de las bases de datos disponibles y la generación de variables de interés para los modelos predictivos.

### 3.1 Bases de Datos Disponibles

#### 3.1.1 Resumen Familia

La base de Resumen Familia corresponde a cerca de 90 mil registros operacionales de máquinas propias y arrendadas en las distintas operaciones mineras, desde el año 2011 a la fecha. Contiene la información de cada equipo agrupada por turno de trabajo, resumiendo las horas efectivas, horas de reserva, horas de pérdida operacional y de mantención. Incluye también registros de producción realizada, metros perforados para los equipos de perforación, número de paladas para los equipos *scoop* y número de vueltas realizadas para los camiones *dumper*. Cada registro corresponde entonces a un resumen de las actividades realizada por un equipo dentro de una jornada de trabajo.

#### 3.1.2 Intervenciones 2012

La primera fuente entrega el detalle de operación del equipo a partir de los registros del operario. Paralelamente la empresa mantiene registros de los mecánicos, quienes entregan el detalle de las intervenciones realizadas en los equipos.

La base de intervenciones cuenta con la información y detalle de todas las intervenciones realizadas en los equipos de estudio. De esta forma es posible identificar las pautas de mantenimiento e intervenciones correctivas realizadas, los tiempos de duración de cada una de ellas, mecánico responsable, entre otras. Al contar con el código de equipo intervenido, fecha y hora de realización de la actividad, es posible incorporar a la base de resumen familia.

Teóricamente la información entregada por Intervenciones debiese coincidir con la entregada por el operario de la máquina, dado que los mecánicos son los únicos encargados de intervenir el equipo. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos de la empresa constructora por homologar la información, estas fuentes de información pueden no conversar entre sí. Dado que existen diferencias entre la información entregada por el operario y mecánico, cobra interés analizar la capacidad predictiva de cada una de las fuentes.

### 3.1.3 Otros

- Evaluación de operarios

La base de evaluaciones contiene el desempeño de los operarios en los test de diagnóstico. Contiene cerca de 50 mil evaluaciones teóricas realizadas durante los años 2011 y 2012, las cuales buscan medir el conocimiento del operario de componentes del equipo y procedimientos. Estas evaluaciones se realizan al momento de contratar al trabajador, realizándose un seguimiento en terreno cada 3 meses. Cada evaluación de diagnóstico viene asociada al RUT del empleado, por lo que es posible rescatar las evaluaciones de los operarios e incorporarlas a la base de datos unificada.

Cabe destacar que actualmente no se cuenta con información de evaluaciones realizadas a los mecánicos, por lo que su habilidad en labores de reparación debe ser cuantificada por medio de otros indicadores.

- Activo Fijo

Contiene el listado de equipos propios de la constructora, precio de compra y año de ingreso a faena. Si bien es posible clasificar los equipos por antigüedad, el hecho de no contar con información de los equipos en arriendo restringe el uso potencial de estos registros.

- Listado de Equipos

Contiene el detalle del equipo, clasificación de acuerdo a familias y subfamilias de equipos, como también su marca y proveedor. Cobra interés estudiar el efecto de la marca sobre el número de fallas de los equipos, potenciando las marcas que reduzcan la ocurrencia de desperfectos.

- Consumo Interno y Cargo Directo

Contiene el detalle de consumo de repuestos del taller y los servicios de reparación externos contratados para los equipos. Si bien cada partida de consumo viene asociado a un equipo particular, la base de consumo interno no entrega información sobre la intervención para la cual se requiere el consumo. Para el caso de Cargo Directo, la base no entrega un detalle del servicio realizado, por lo que no es posible saber con certeza si el trabajo realizado fue correctivo o preventivo.

Esta información resulta útil para analizar los gastos anuales para cada equipo, sobre el cual es posible obtener un costo estimado de cada una de las intervenciones realizadas. Este cruce se realiza a partir del código y día en que se realiza la intervención.

### 3.2 Equipos Críticos

Para determinar los equipos de interés en la operación se realizan los siguientes análisis: Precio de equipos y participación en el valor total de flota, gasto en repuestos durante el año 2012 y horas de falla por equipo.

**Tabla 4. Participación del equipo en el valor total de flota**

Rótulos de fila	Participación de valor de flota 2012
Perforación Avance	47.7%
Dumper	14.2%
Scoop	25.0%
Grúa	11.0%
Retroexcavadora	1.2%
Mini Cargador	0.4%
Roboshot	0.4%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo

Destacan los equipos de perforación avance, equipos *dumper* y equipos *scoop* por su alto valor de adquisición<sup>2</sup>, como también su participación con respecto al valor total de la flota. A partir del número y valor estimado se determina el valor de flota en más de US\$ 10 millones, de los cuales el 85,89% del valor lo componen los tres primeros equipos.

Considerando el gasto promedio por equipo en repuestos destacan en los primeros lugares los equipos *scoop*, *dumper* y *jumbo*.

<sup>2</sup> Precios de adquisición no se incluyen en el informe.

**Tabla 5. Consumo promedio mensual en repuestos (Base = Perforación Avance)**

<b>Equipo</b>	<b>Gasto promedio mensual por equipo</b>
Scoop	1.80
Dumper	1.17
Perforación Avance	1.00
Grúa	0.29
Retroexcavadora	0.18
Mini Cargador	0.08
Roboshot	0.01

Fuente: Elaboración propia a partir de registros de consumo

A partir de la Tabla 5, se observa la importancia de los equipos de perforación, *dumper* y *scoop* en el gasto de repuestos. Destaca también la diferencia entre los tres mayores gastos y las grúas. Realizar el análisis por equipo permite mitigar el efecto del número de equipos, efecto particularmente importante para el caso de las grúas.

El último factor considerado corresponde al número y horas de falla promedio por equipo. Al igual que para el gasto en repuestos, se busca anular el efecto del número de equipos.

**Tabla 6. Horas de falla por equipo**

<b>Rótulos de fila</b>	<b>N° de fallas por equipo</b>	<b>Horas de falla por equipo</b>
Perforación Avance	21	43
Retroexcavadora	8	29
Dumper	5	19
Scoop	5	16
Mini Cargador	3	8
Grúa	2	6
Roboshot	2	5

Fuente: Elaboración propia a partir de registros operacionales

En este criterio destacan las perforadoras de avance, quienes se alejan de forma importante de las retro excavadoras. Si bien no se repiten los tres primeros lugares, las perforadoras, *scoop* y *dumpers* se ubican dentro de los 4 equipos críticos.

Considerando todos los criterios desarrollados se concluye que los equipos críticos para la obra en estudio corresponden a perforadoras de avance, *scoop* y *dumpers*.

### 3.3 Caracterización Intervenciones 2012

Actualmente la empresa constructora tiene una política de pautas de mantención basada en horas de trabajo de los equipos. De esta forma, una intervención preventiva puede ser realizada semanalmente, cada 125, 250, 500 y 1000 horas de trabajo efectivo, dependiendo del tipo de equipo.

**Tabla 7. Detalle de pautas realizadas en los equipos**

Rótulos de fila	Semanal	125 Hrs	250 Hrs	500 Hrs	1000 Hrs
Dumper		X		X	X
Jumbo	X	X		X	X
Scoop		X	X	X	X

Fuente: Protocolo de pautas de mantención

De esta forma, para el caso de la pauta de 125 horas de los equipos Jumbo, la pauta de mantención incluye lavado del equipo y revisión completa del equipo, incluyendo lubricación, soldadura, neumáticos, etc.

Durante el año 2012 se registra un total de 1539 intervenciones sobre un total de 40 equipos críticos asignados a la obra de interés. El detalle de las intervenciones es el siguiente.

**Tabla 8. Distribución de intervenciones por tipo de equipo**

Rótulos de fila	Intervenciones Correctivas	Intervenciones Preventivas	% Intervenciones Correctivas
Dumper	76	12	86.4%
Jumbo	895	156	85.2%
Scoop	305	95	76.3%

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de intervenciones

A partir de la Tabla 8 se observa una presencia importante de mantenimiento preventivo en los equipos *scoop*, en donde el porcentaje de mantenciones preventivas se encuentra alrededor del 25% del total. Equipos *dumper* y *jumbo* presentan bajos niveles de mantenimiento preventivo, cercanos al 15% del total de intervenciones.

**Tabla 9. Días promedio entre tipos de intervenciones**

Rótulos de fila	C-C	Frecuencia	P-C	Frecuencia	P-P	Frecuencia
Dumper	8.15	69	10.00	3	4.60	5
Jumbo	3.96	790	9.83	43	5.59	53
Scoop	5.57	243	13.74	20	5.42	32

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de intervenciones

Donde 'C' corresponde a una mantención correctiva y 'P' a una mantención preventiva. De esta forma, 'C-C' corresponde a dos actividades correctivas consecutivas, mientras que 'P-P' a dos actividades preventivas.

A partir de la Tabla 9 se observa un aumento de los días entre intervenciones, en la medida que se realiza un mantenimiento preventivo antes de una intervención correctiva. Este resultado refleja en parte los beneficios de contar con una política importante de mantenimiento preventivo, en la medida que aumenta los días para la próxima falla.

**Tabla 10. Intervalos promedio entre mantenciones preventivas**

Rótulos de fila	Días promedio entre preventivas	HE promedio entre preventivas	Producción promedio entre preventivas
Dumper	28	48 (HE)	164 (vueltas)
Jumbo	19	49 (HE)	2,685 (metros)
Scoop	19	63 (HE)	484 (paladas)

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de intervenciones

A partir de los días entre intervenciones preventivas y las producciones diarias promedio, es posible obtener para cada equipo el intervalo productivo entre dos intervenciones preventivas. De esta forma, se obtienen una producción de 164 vueltas para el caso de los camiones de bajo perfil, 2685 metros de perforación para los equipos *jumbo* y 484 paladas para el caso de los *scoop*.

**Tabla 11. Detalle de costo y duración de mantenciones<sup>3</sup>**

Rótulos de fila	Costo Correctiva	Costo Preventiva	Duración Correctiva (hrs)	Duración Preventiva (hrs)
Dumper	75	40	3.80	3.67
Jumbo	166	47	2.76	2.03
Scoop	376	126	2.54	2.50

Fuente: Elaboración propia a partir de registro de intervenciones

A partir de los costos promedio se observa un ahorro interesante en caso de pasar a una política de mantenimiento preventivo. Para el caso de los equipos *dumper* el ahorro alcanza niveles cercanos al 50%, alrededor de un 75% para el caso de los *jumbo* y cerca de un 66% para el caso de los equipos *scoop*. En cuanto a los tiempos de detención promedio, si bien los mantenimientos preventivos se desarrollan en menores niveles de tiempo, con excepción de los equipos *jumbo*, los tiempos se mantienen estables.

### 3.4 Consolidación de Información

La consolidación de registros comienza con la limpieza de Resumen Familia, para luego incorporar nuevos antecedentes de las bases de Intervenciones y Evaluaciones.

#### 3.4.1 Limpieza de Resumen Familia

De la base original de 90 mil registros se extraen todos los registros pertenecientes a las sublocalizaciones de la obra de interés. Se agrega un filtro de año y de equipo para extraer registros del año 2012 y de los equipos críticos *jumbo*, *scoop* y *dumper*. De esta extracción se obtienen 17,610 registros de interés.

Para esta selección se realiza un conteo de registros semanales para cada equipo. En caso de contar con todos los registros operacionales, debiese contar con 14 registros. A partir de este análisis se identifica un exceso de registros para semanas particulares, alcanzando en algunos casos los 28 registros. Esta duplicación de información coincide con el cambio de código de sublocalizaciones realizada en Junio. La mayoría de los registros son identificados fácilmente, puesto que duplican exactamente la misma información o bien presentan un equipo operativo versus uno completamente paralizado. Una pequeña fracción de los registros duplicados es eliminada aleatoriamente, puesto que las diferencias de información son mínimas. En esta limpieza sobreviven 16,316 registros.

<sup>3</sup> Por motivos de confidencialidad de información, los valores de costos han sido divididos por una constante.



El último criterio de limpieza para la base de datos es el número de registros semanales. Dado que una cantidad significativa de registros perdidos por semana puede invalidar la información, es necesario extraer las semanas con un número suficiente de datos. Para ello se determina un límite de 75% de registros mínimos para que una semana sea válida. De esta forma 14,174 registros, que equivalen al 87% de los registros anteriores, se mantienen para los modelos predictivos.

### **3.4.2 Intervenciones 2012**

Una vez terminada la limpieza de Resumen Familia se incorpora la información de las Intervenciones 2012. A partir de la fecha y hora de intervención se obtiene el día y turno correspondiente al registro operacional. Estos dos campos junto al código del equipo intervenido permiten el cruce de información con la base de Resumen Familia. Los campos incorporados corresponden al tipo de intervención, duración en horas, detalle del trabajo realizado y responsable de la intervención. Cabe destacar que el detalle de esta base de datos permite identificar las pautas de mantenimiento realizadas a lo largo del año.

### **3.4.3 Evaluaciones**

Las evaluaciones de operarios consideran los test de diagnósticos realizados a los empleados de la empresa constructora. Se extraen la totalidad de las evaluaciones realizadas durante el año 2012 y se obtiene un promedio de desempeño por operario, identificado con su RUT. A partir de esta información se obtiene el desempeño promedio del operario durante el año. Dado que los registros de Resumen Familia consideran el RUT del operario a cargo del equipo, es posible analizar el impacto de la evaluación sobre la ocurrencia de fallas. El promedio de evaluación 2012 se incorpora a la base de datos por medio del RUT del operador asignado al equipo.

## **3.5 Base Consolidada**

Para la base consolidada final se ordenan los registros por equipos, fecha de trabajo y turno correspondiente a la jornada asignada. Una vez ordenada la base de datos, se eliminan los registros de tal forma que el primero corresponda a una jornada de trabajo posterior a una mantención correctiva. De esta forma, las variables acumuladas pueden rescatar la información histórica disponible.

**Tabla 12. Detalle de registros por tipo de equipo**

<b>Rótulos de fila</b>	<b>Registros finales</b>	<b>Número de equipos</b>
Dumper	842	2
Jumbo	7,987	19
Scoop	3,681	15

Fuente: Elaboración propia a partir de registros operacionales

A partir de la Tabla 12, se observan los registros finales para cada tipo de equipo en estudio, una vez terminado el procesamiento de registros. Para cada tipo de equipo se observa un número menor de registros que el teórico. Para el caso de los equipos *dumper*, suponiendo que existen 365 días de trabajo, con 2 jornadas o turnos por día, los camiones de bajo perfil debiesen contar con cerca de 1460 registros. Esta diferencia se debe a que un equipo puede haber sido asignado a mediados de año, o bien retirado terminado su período de operación. La pérdida de registros operacionales también puede explicar la diferencia de registros en periodos específicos, situación que pudo verse potenciada por un paro de actividades de los trabajadores de la empresa constructora.

### **3.6 Generación de Variables de Interés**

A partir de la base de datos consolidada de datos, la cual contempla registros operacionales de Resumen Familia, tipos y duración de intervenciones realizadas y la evaluación promedio de los operarios, se generan variables que expliquen la ocurrencia de fallas.

Dentro de los factores que contribuyen al costo de mantenimiento de equipos destacan la edad y diseño del equipo, la habilidad del operario, entrenamiento y experiencia del equipo de mantención, errores de mantenimiento, importancia del mantenimiento dentro de la empresa y el ambiente en el que se desarrolla el mantenimiento [1]. Con tal de incluir el mayor número de factores posibles se realizan una serie de supuestos en base a la información disponible. La evaluación promedio del operario se asume como una medida aproximada de su habilidad. La información del año de fabricación no se tiene para todos los equipos, por lo que se incorpora utilizando el primer registro disponible del horómetro. Para el caso de habilidad del mecánico o el cumplimiento de labores de mantenimiento preventivo no se cuenta con información, por lo que no se incluyen en los modelos predictivos.

A continuación se detallan las variables generadas.

- **Falla:** Variable binaria con valor 1 si el equipo registra horas de intervención correctiva durante una jornada de 9 horas de trabajo. Se determina a partir de la información proporcionada por el mecánico, no del operario.
- **Código Equipo:** Corresponde al código identificador único del equipo.
- **Horas Efectivas:** Horas efectivas de trabajo del equipo. Se divide en HE el turno, día y semana anterior, como también el acumulado desde el último evento registrado. Por evento se define cualquier mantenimiento realizado, sea correctivo o preventivo.
- **Horas Reserva:** Horas en que el equipo se encuentra detenido, a pesar de encontrarse disponible para producir. Se divide en HR registradas del turno, día y semana anterior, como también el acumulado desde el último evento registrado.
- **Producción:** Dependiendo del tipo del equipo, se registra la producción efectiva del turno, día y semana anterior, como también el acumulado desde el último evento registrado. En el caso de las perforadoras corresponde a los metros perforados, número de paladas para el caso de los equipos *scoop* y número de vueltas para los camiones de bajo perfil o *dumper*.
- **Horas Correctivas:** Obtenidas a partir de la duración de las intervenciones realizadas y aquellas registradas por el operario en Resumen Familia. Indican las horas de mantenimiento correctivo el turno, día y semana anterior.
- **Horas Preventivas:** Análogo a Horas Correctivas pero para el caso de la aplicación de pautas de mantenimiento y horas de mantenimiento registradas por el operario.
- **Velocidad de Producción:** Dependiendo del equipo, se calcula las velocidad de perforación, de palada y de vuelta. Permite medir el esfuerzo realizado por el equipo el turno anterior y el esfuerzo promedio el día y semana anterior.
- **Participación Operario:** A partir del RUT de los operarios asignados, se calcula el porcentaje de uso del equipo durante la semana anterior.
- **Tipo Equipo:** A partir del primer horómetro registrado se realiza una agrupación en 3 grupos de igual tamaño. De esta forma, el primer grupo corresponde a los equipos de menor antigüedad en la flota.
- **Tipo Operario:** Análoga a la variable Tipo Equipo, pero utilizando la evaluación promedio de cada operario. De esta forma, el primer grupo de operarios corresponde a los de menor desempeño en las evaluaciones.

- **Tipo Mecánico:** Análogo a Tipo Equipo, pero utilizando la duración promedio de las mantenciones realizadas por cada mecánico. A mayor tipo mecánico, mayor duración de sus intervenciones. Notar que esto puede deberse a que realiza labores minuciosamente o bien trabaja mayoritariamente en fallas graves.
- **Obra:** Corresponde a una de las tres sublocalizaciones asignada al equipo. Cada una de ellas tiene un código único: 1641, 1642 y 1643.
- **Marca:** Corresponde a la marca del equipo.
- **Equipo Propio o Arrendado:** Entrega la propiedad del equipo, 'MA' para los equipos arrendados y 'M' para las máquinas pertenecientes a la constructora.

## Capítulo 4: Implementación de Modelos Predictivos

A partir de la consolidación y tratamiento de datos, se obtiene una base analítica para cada tipo de equipo, donde cada registro representa el resumen de actividad de un equipo durante una jornada o turno de trabajo.

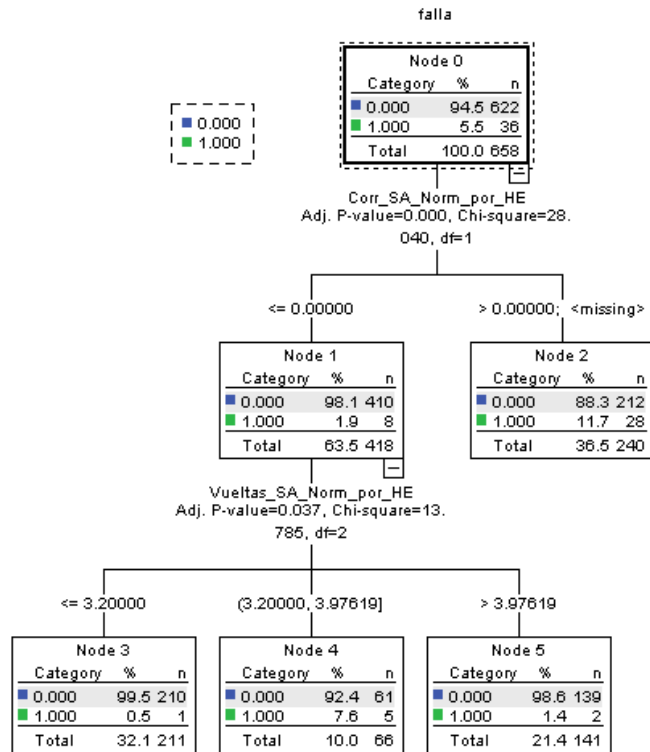
La implementación de modelos predictivos se realiza en tres etapas. En primer lugar, un análisis mediante árboles de decisión permite identificar variables significativas que permiten segmentar registros con presencia de fallas. Posteriormente, se busca el ajuste de distribuciones de probabilidad para los intervalos de trabajo entre mantenimientos correctivos. En caso de existir ajuste, se escoge una distribución para determinar un intervalo de mantenimiento. En caso de no presentar ajuste, se procede a la implementación de modelos predictivos de minería de datos, específicamente Regresión Logística y *Support Vector Machine* (SVM). Con la implementación de estos modelos, se busca determinar la influencia de variables de interés sobre la ocurrencia de fallas, para posteriormente generar distintos escenarios operativos que permitan determinar la probabilidad de falla futura. A partir de las medidas de desempeño, descritas en el Capítulo 2, se escoge el modelo de mayor poder predictivo para el análisis posterior.

### 4.1 Análisis Equipos Dumper

#### 4.1.1 Árbol de Decisión

A partir de la base de datos de los camiones de bajo perfil se implementan árboles de decisión. El modelo se realiza considerando todas las variables generadas normalizadas, entrenando sobre un 80% de la base y evaluando sobre el 20% restante. De esta forma se determinan los factores que discriminan de mejor forma la ocurrencia de fallas.

## Ilustración 1. Árbol de Decisión - Equipo Dumper



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

**Tabla 13. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Dumper**

Código	Significado
Corr_SA_Norm_por_HE	Horas correctivas semana anterior, registradas por mecánico y normalizadas por hora efectiva
Vueltas_SA_Norm_por_HE	Producción en vueltas semana anterior, normalizadas por hora efectiva <sup>4</sup>

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Ilustración 1 se observa el modelo generado. El nodo 0 de la figura presenta el total de los 658 registros utilizados en el análisis, de los cuales 5.5% equivalen a registros con presencia de fallas. La identificación de los registros con intervenciones correctivas se realiza mediante la variable dependiente 'falla', la cual toma el valor 1 en caso de presentar una reparación correctiva y 0 en caso contrario.

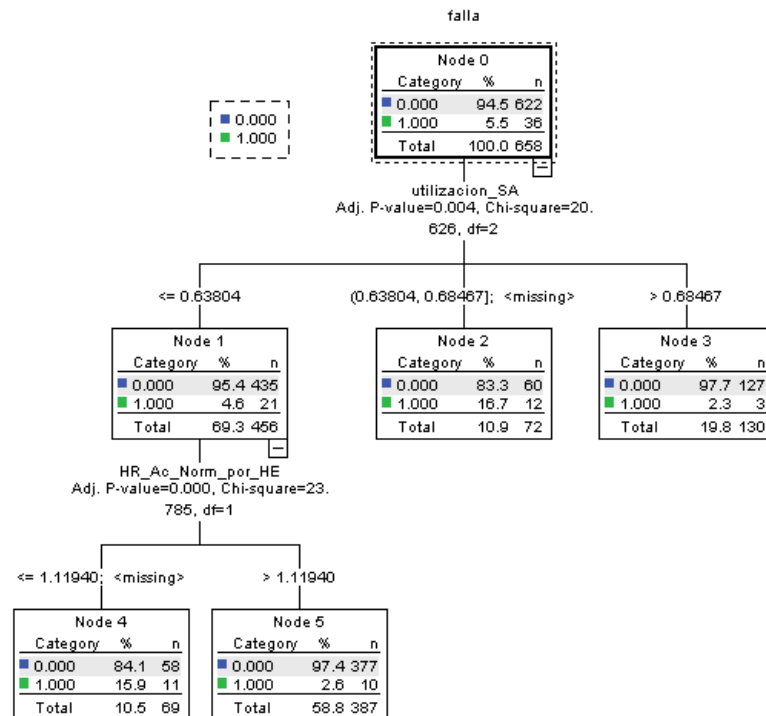
<sup>4</sup> La variable de producción normalizada por horas de trabajo equivale a la velocidad productiva.

A partir del nodo inicial se genera el primer corte de clasificación. Seleccionando la variable de horas correctivas normalizadas durante la semana anterior, el modelo separa los 658 registros iniciales en registros sin horas correctivas, o menores iguales a cero, de aquellos registros con valores mayores que cero o *missing value*. Cabe destacar que los registros con valores perdidos corresponden a equipos que no presentan producción. Se observa un aumento de la proporción de registros de falla, de un 1.9% a 11.7% para aquellos equipos que presentan horas correctivas anteriores o bien no presentan producción.

A partir del nodo 1, el algoritmo realiza un segundo corte con la variable de número de vueltas, normalizadas por hora efectiva de trabajo, durante la semana anterior. De esta forma, clasifica los 418 registros anteriores en 3 grupos distintos. Aquellos registros con un número de vueltas menor a 3.2, entre 3.2 y 3.97, y mayores a 3.97. Si bien no presenta un aumento constante, mediante la agrupación de los nodos 4 y 5, se observa que la proporción de registros con intervenciones correctivas aumenta de 0.5% a 3.5% si el equipo presenta más de 3.2 vueltas por hora.

El análisis se repite sin considerar las variables de horas correctivas. De esta forma se busca determinar el segundo criterio que permite la predicción de intervenciones correctivas. Se obtiene el siguiente resultado.

**Ilustración 2. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Dumper**



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

**Tabla 14. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipo Dumper**

<b>Código</b>	<b>Significado</b>
utilización_SA	Utilización observada durante la semana anterior, no requiere normalización
HR_Ac_Norm_por_HE	Horas de reserva acumuladas desde el último evento <sup>5</sup> , normalizadas por hora efectiva.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Ilustración 2 se observa que la utilización de la semana anterior corresponde a la variable discriminante del modelo. Si bien el crecimiento no es constante, agrupando los nodos 2 y 3 se observa un aumento de la probabilidad de 4.5% a 8% cuando la utilización sobrepasa el límite de 0.63. Por el contrario, las horas de reserva disminuyen la probabilidad de falla en la medida que aumente la proporción de horas sin producción.

A partir del análisis descriptivo se observa una fuerte influencia de las horas correctivas anteriores del equipo. Esto puede ser indicio de una mantención incorrecta o incompleta, ya sea porque el equipo de reparación se ve sobrepasado por las fallas o porque se prioriza la producción por sobre la reparación del equipo. Cabe destacar que el modelo y variables actuales no son capaces de entregar la causa principal que explique este fenómeno. Obviando la variable de horas correctivas, el modelo depende de la utilización y las horas de reserva del equipo.

#### **4.1.2 Distribuciones de Probabilidad**

A partir de los registros seleccionados se obtienen las horas de trabajo entre mantenciones correctivas. Estos tiempos se dividen en dos grupos dependiendo si el tiempo registrado corresponde a dos mantenciones correctivas consecutivas o bien a una mantención preventiva seguida de una correctiva.

Por medio de un software estadístico se obtienen los ajustes de distribuciones para las horas efectivas observadas entre dos fallas consecutivas.

---

<sup>5</sup> Por evento se entiende una intervención correctiva o preventiva.



### Ilustración 3. Ajuste de Distribuciones - Equipos Dumper

Auto::Fit Distributions

distribution	rank	acceptance
Log-Logistic(0, 1.33, 8.15)	98.6	accept
Inverse Gaussian(0, 5.26, 21.8)	96.7	accept
Lognormal(0, 2.15, 1.31)	95.6	accept
Pearson 5(0, 0.84, 3.56)	83	accept
Pearson 6(0, 2.63, 2.75, 1.15)	78.8	accept
Weibull(0, 0.71, 16.8)	21.8	accept
Gamma(0, 0.651, 33.5)	1.75	accept
Beta(0, 450, 0.517, 7.81)	0.0435	reject
Exponential(0, 21.8)	0.00745	reject
Erlang(0, 1, 21.8)	0.00745	reject
Uniform(0, 352)	0	reject
Triangular(-1, 360, -1)	0	reject
Pareto	no fit	reject

Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

A partir de la Ilustración 3 se observa un excelente ajuste de los registros, siendo aceptadas 7 distribuciones de probabilidad. Si bien la distribución Weibull es de las últimas distribuciones aceptadas por el software, el análisis de sus parámetros entrega resultados interesantes. Dado un parámetro de forma menor a 1, las fallas observadas responden a un fenómeno de mortalidad infantil, evidencia de posibles problemas en el mantenimiento de equipos, operación o sistema de adquisición de repuestos [15]. Este fenómeno se explica por un periodo de ajuste del equipo en la operación de trabajo, ya sea por fallas de fábrica o un aprendizaje requerido por los operarios.

Para el análisis de simulaciones se determina utilizar la distribución Lognormal. A pesar de ser la tercera distribución en el ranking, la diferencia con los dos primeros lugares es reducida. Además, esta distribución tiene la ventaja de encontrarse implementada como función de Microsoft Excel, simplificando el análisis.

Para el caso de las fallas que presentan una actividad de mantenimiento preventivo no es posible el ajuste de una distribución de probabilidad, dado que no se alcanza el mínimo de registros requerido por el software estadístico. Para incluir el efecto del mantenimiento preventivo se asume una distribución normal de promedio y desviación estándar 27.45 y 36.24 respectivamente, parámetros calculados a partir de los casos disponibles.

Se determinan las medidas de desempeño para una eventual predicción por medio de distribuciones de probabilidad. A partir de las horas efectivas acumuladas del turno anterior, es posible calcular la probabilidad de falla de la jornada actual a partir de la distribución lognormal obtenida. A partir de un *threshold* de 0.25, se obtienen los indicadores de predicción de los registros con presencia de intervenciones correctivas.

**Tabla 15. Medidas de desempeño - Equipos Dumper**

	Árbol de Decisión	Distribución de Probabilidad
Proporción Inicial	5.5%	6.3%
Precisión	0%	5.1%
Recall	0%	76.5%
F-measure	-	10%

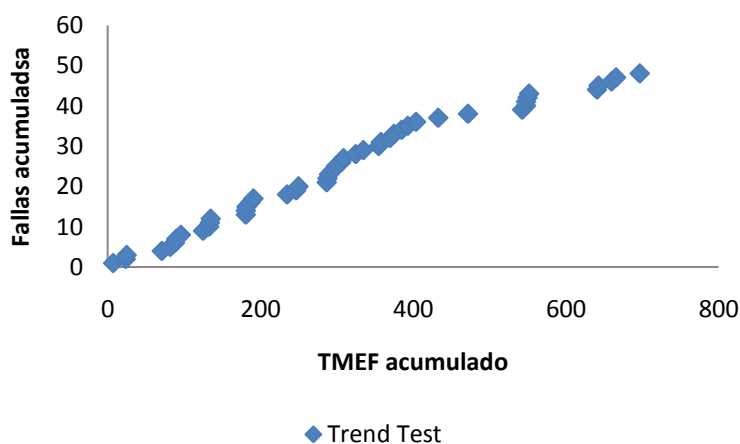
Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

Se observa una predicción pobre, incluso menor que la proporción inicial de los registros, pero un *recall* interesante, el cual permite obtener un *F-measure* en torno al 10%. Si bien los indicadores de desempeño son bajos, se encuentran por encima de los indicadores del árbol de decisión, el cual no logra una clasificación suficiente para realizar una predicción.

#### 4.1.2.1 Test de independencia

Para continuar con el análisis por medio de distribuciones de probabilidad, es necesario validar el supuesto de fallas independientes idénticamente distribuidas (IID). En la práctica, el supuesto no puede ser asumido inmediatamente debido a variaciones en prácticas de mantenimiento, componentes con distinto ciclo de vida, entre otros [16]. Para ello, se aplica el procedimiento utilizado por Hall (1997). Por medio de análisis gráficos se analiza la existencia de tendencias y correlaciones entre los tiempos medios entre fallas (TMEF). Para el caso de los equipos Dumper se tienen los siguientes resultados.

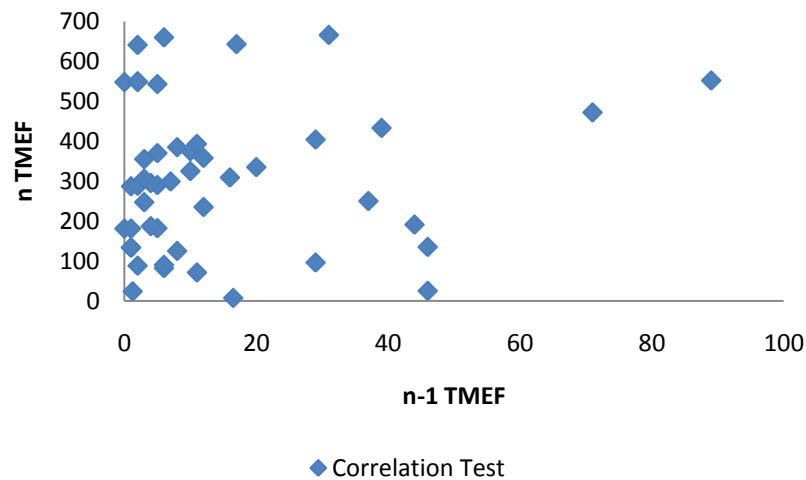
**Gráfico 9. Test de tendencia - Equipos Dumper**



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

Para el análisis de tendencia se realiza un análisis gráfico del número acumulado de fallas vs los TMEF acumulados. En caso de presentar una forma cóncava o convexa se concluye la existencia de una tendencia en los datos. Para el caso particular, si bien existen tramos con una leve concavidad, se observa un comportamiento lineal de los registros de intervenciones. Por lo tanto, se concluye la inexistencia de tendencias en los registros operacionales.

**Gráfico 10. Test de correlación - Equipos Dumper**



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *dumper*

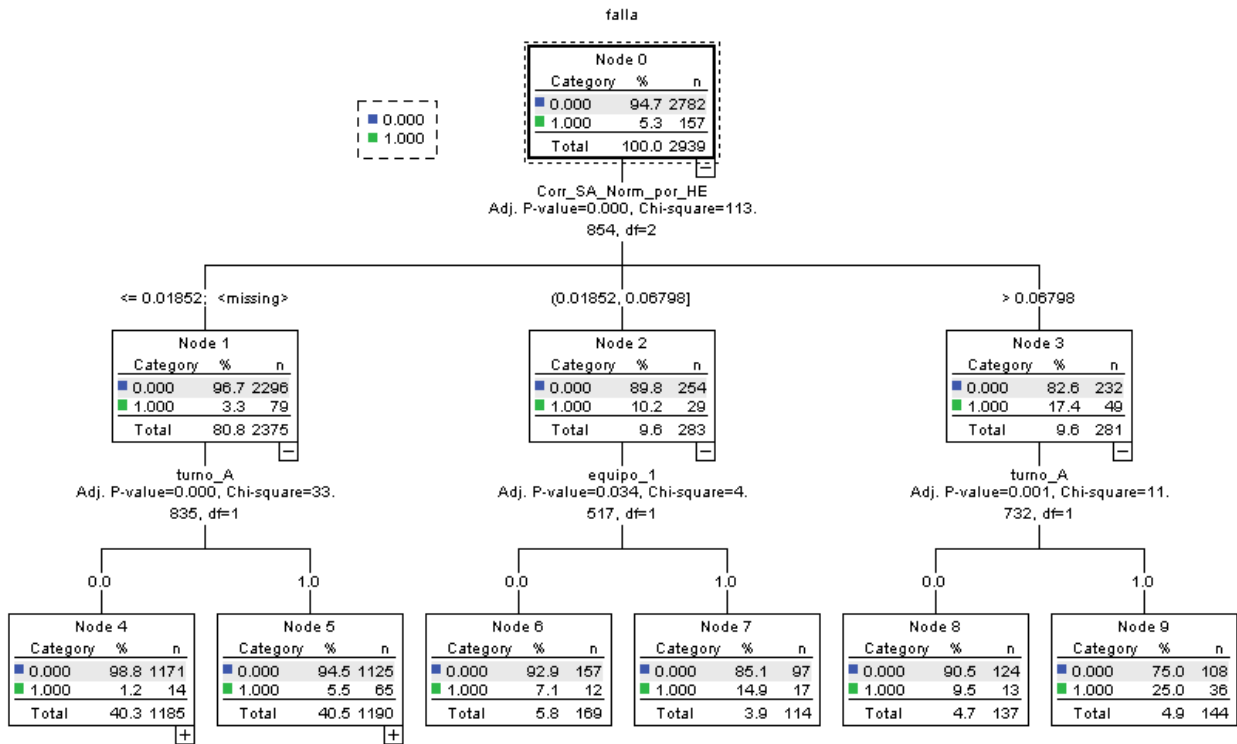
Para el caso del análisis de correlación, la inexistencia de linealidad en el gráfico de dispersión permite concluir la independencia de los registros de fallas. Considerando el resultado anterior, es posible continuar con el análisis de distribuciones bajo el supuesto de fallas IID.

## 4.2 Análisis Equipos Scoop

### 4.2.1 Análisis Descriptivo

Para el caso de los equipos *scoop* el árbol de decisión muestra el mismo fenómeno que los equipos *dumper*. Las horas correctivas corresponden al primer factor de clasificación del modelo, aumentando la proporción de fallas en la medida que aumentan las horas correctivas. A continuación se presenta la primera clasificación del árbol, el modelo completo puede encontrarse en Anexos B.1.

### Ilustración 4. Árbol de Decisión - Equipo Scoop



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *scoop*

**Tabla 16. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Scoop<sup>6</sup>**

Código	Significado
Corr_SA_Norm_por_HE	Horas correctivas semana anterior, registradas por mecánico y normalizadas por hora efectiva
turno_A	Variable binaria que identifica los registros de jornada diurna.
equipo_1	Variable binaria que identifica los registros clasificados como equipos de menor antigüedad.

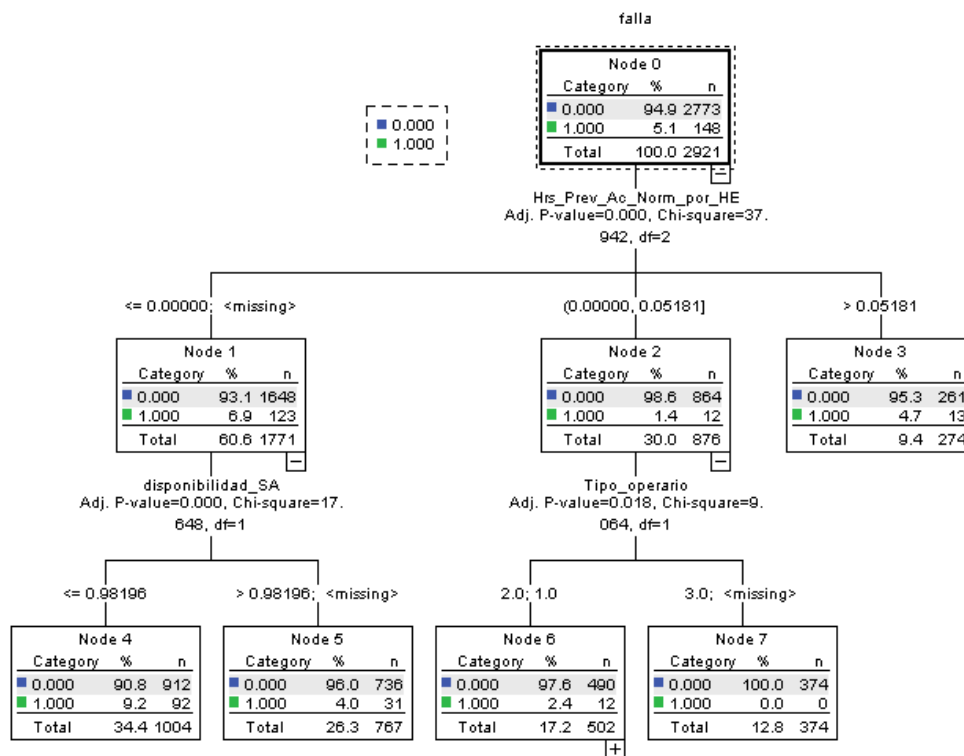
Fuente: Elaboración propia

El segundo nivel del modelo determina como variables significativas turno A y equipo tipo 1. La primera variable, que corresponde a los registros con jornada diurna, aumenta la proporción de fallas observadas. Considerando que el turno anterior corresponde a un turno nocturno de mayor productividad, tiene sentido que una eventual exigencia productiva provoque fallas durante el turno siguiente. El hecho que un equipo tipo 1, correspondiente a los equipos de menor antigüedad en la obra, aumente la probabilidad de falla es contra intuitivo. Sin embargo, estas fallas pueden ocasionarse por un efecto de mortalidad infantil en equipos.

<sup>6</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.

Al igual que para los equipos Dumper, se realiza nuevamente el análisis descriptivo sin considerar las variables de horas correctivas anteriores. El modelo de árbol de decisión completo se encuentra en la sección de Anexos B.2.

### Ilustración 5. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Scoop



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos scoop

Tabla 17. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipos Scoop<sup>7</sup>

Código	Significado
Hrs_Prev_Ac_Norm_por_HE	Horas preventivas acumuladas desde el último evento <sup>8</sup> , normalizadas por horas efectivas.
disponibilidad_SA	Disponibilidad física observada durante la semana anterior.
tipo_operario	Clasificación del operario de 1 a 3, de acuerdo al desempeño en evaluaciones teóricas. A mayor clasificación mejor desempeño.

Fuente: Elaboración propia

<sup>7</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.

<sup>8</sup> Por evento se entiende una intervención correctiva o preventiva.

En esta segunda implementación el modelo determina las horas de mantenimiento preventivo acumulado como el primer factor de separación. Si bien el descenso no es directo, se observa un comportamiento decreciente a medida que aumentan las horas de mantención preventiva.

En los niveles inferiores el modelo determina que la disponibilidad y tipo de operario como aquellas variables que clasifican de manera significativa. La disponibilidad, que aumenta la proporción de falla en la medida que aumenta su valor es contra intuitiva, puesto que un equipo que ha fallado en el pasado debiese producir sin inconvenientes hoy. Sin embargo, considerando que los modelos indican la recurrencia de las fallas, tiene sentido que un equipo que ha presentado fallas permanezca en ese estado. El comportamiento de esta variable se explica entonces por la particularidad de las fallas de estos equipos. Las variables que tienen relación con el operario son interesantes. Los operarios tipo 1 y 2, que corresponden a los peores desempeños en las pruebas de diagnóstico, concentran un mayor porcentaje de las fallas que el operario tipo 3, quien obtuvo los mejores resultados.

Si bien el tercer nivel se encuentra oculto en la Ilustración 6, la participación del operario presenta un comportamiento decreciente al agrupar los nodos 9 y 10, pasando de 3.2% de falla a 1.9%. Esta variable equivale al porcentaje de 14 turnos anteriores (equivalente a una semana de trabajo) asignado al mismo equipo. Es decir, un operario que es asignado con frecuencia a un equipo particular presenta un mejor desempeño que aquel operario que es reasignado.

#### 4.2.2 Distribuciones de Probabilidad

A pesar de alcanzar *rank's* elevados, en el caso de los equipos *scoop* no se acepta ninguna distribución de probabilidad. Por esta razón no es necesario implementar los test gráficos desarrollados para demostrar el supuesto IID de las fallas registradas.

#### Ilustración 6. Ajuste de Distribuciones - Equipos Scoop

Auto::Fit Distributions		
distribution	rank	acceptance
Inverse Gaussian[0, 10.6, 35.2]	100	reject
Pearson 5[0, 0.796, 6.48]	45.8	reject
Pearson 6[0, 10.6, 1.93, 1.37]	15.6	reject
Lognormal[0, 2.84, 1.29]	8.45	reject
Log-Logistic[0, 1.33, 16.8]	5.65	reject
Weibull[0, 0.779, 32.9]	1.67	reject
Gamma[0, 0.824, 42.7]	0.00208	reject
Exponential[0, 35.2]	0	reject
Uniform[0, 620]	0	reject
Erlang[0, 1, 35.2]	0	reject
Triangular[-1, 623, -1]	0	reject
Beta[0, 3.86e+03, 0.414, 21.8]	0	reject
Pareto	no fit	reject

Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *scoop*

Dado los resultados negativos en el ajuste de distribuciones, se procede a la implementación de modelos de minería de datos para la predicción de intervenciones correctivas o fallas.

#### 4.2.3 Regresión Logística y Support Vector Machine - Equipos Scoop

Para los registros seleccionados de los equipos *scoop* se implementan modelos de Regresión Logística y *Support Vector Machine*. El primero utiliza un método *Forward Conditional* que permite seleccionar por pasos las variables de mayor significancia estadística para el modelo, mientras que el segundo utiliza modelo de selección de atributos basado en un SVM, seguido de la aplicación de un modelo SVM lineal. Ambos modelos fueron entrenados sobre el 80% de los registros seleccionados y testeados sobre el 20% restante.

A partir de las medidas de desempeño descritas en la sección 2.4, y definiendo un *threshold* constante igual a 0.25, podemos seleccionar el modelo con mayor poder predictivo.

**Tabla 18. Medidas de desempeño - Equipos Scoop**

Escenarios	Regresión Logística	Support Vector Machine
Proporción Inicial	4.7%	4.7%
Precisión	30%	4.03%
Recall	8.57%	64%
F-measure	13.3%	7.5%

Fuente: Elaboración propia a partir de desempeños de modelos predictivos

A partir de la Tabla 18 se observa un modelo de Regresión Lineal con niveles de precisión cercanos al 30%, cerca de 6 veces la proporción inicial de los registros con fallas. Sin embargo, el modelo solo es capaz de detectar el 8.5% del total de fallas en los registros. El SVM en cambio, presenta un comportamiento totalmente opuesto, con una baja precisión, incluso menor que la proporción inicial de registros. Sin embargo, presenta niveles importantes de *recall*, permitiéndole detectar cerca del 65% del total de fallas presentes. Por medio del *f-measure* se determina el modelo de Regresión Logística como el modelo de mayor poder predictivo frente a los registros Scoop.

El modelo seleccionado se completa después de 6 iteraciones, incorporando 6 variables significativas al 10%. Las variables seleccionadas son las siguientes.

**Tabla 19. Variables seleccionadas Regresión Logística - Equipos Scoop**

		B	Sig.	Exp(B)
Step 6 <sup>f</sup>	Pal_SA_Norm_por_HE_Max1	2.147	.022	8.562
	Corr_SA_Norm_por_HE_Max1	6.591	.000	728.780
	obra1643	-.908	.014	.403
	mec_1	.741	.026	2.098
	equipo_3	.585	.020	1.795
	turno_B	-1.463	.000	.232
	Constant	-2.924	.000	.054

Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *scoop*

**Tabla 20. Códigos de variables - Regresión Logística- Equipos Scoop<sup>9</sup>**

Código	Significado
Pal_SA_Norm_por_HE_Max1	Producción del equipo en número de paladas durante la semana anterior. Variable se encuentra normalizada por horas efectivas de trabajo y normalizada nuevamente para tener valores entre 0 y 1.
Corr_SA_Norm_por_HE_Max1	Horas correctivas durante la semana anterior, normalizadas por horas efectivas de trabajo y normalizadas para tener valores entre 0 y 1.
Obra1643	Variable binaria con valor 1 si el equipo trabaja en la obra 1643 y 0 en caso contrario.
Mec_1	Variable binaria con valor 1 si el equipo fue reparado por un mecánico tipo 1, 0 en caso contrario.
Equipo_3	Variable binaria con valor 1 si el equipo corresponde a un equipo tipo 3, 0 en caso contrario.
Turno_B	Variable binaria con valor 1 si el registro corresponde a una jornada de trabajo B, equivalente a un turno nocturno. 0 en caso contrario.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 19 se observa los principales componentes del modelo de regresión logística. La columna 'B' representa la constante de regresión de cada una de las variables, 'Sig' la significancia de la variable y 'Exp(B)' el valor de la exponencial evaluada en la columna 'B'.

A partir de las variables normalizadas el modelo de regresión logística entrega, al igual que el primer modelo de árbol de decisión, una fuerte dependencia de las horas correctivas de la semana pasada, aumentando la probabilidad de falla a medida que aumentan las horas correctivas anteriores. La producción del equipo sigue la misma línea, aumentando la probabilidad a mayor número de paladas durante la semana anterior. En menor medida, un equipo tipo 3, que corresponde a los equipos de mayor antigüedad, y un mecánico tipo 1, que corresponde a un mecánico con bajos tiempos

<sup>9</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.



de reparación, aumentan la probabilidad de falla. Por el contrario la sublocalización 1643 y el trabajo durante el turno B reducen levemente la ocurrencia de intervenciones correctivas.

Si bien no se cuentan con variables de mantención preventiva, a partir del modelo es posible realizar escenarios de producción de los equipos. De esta forma, podemos determinar un intervalo alternativo de mantención a partir de un límite máximo de producción.

### 4.3 Análisis Equipos Jumbo

#### 4.3.1 Distribuciones de Probabilidad

Al igual que para el caso de los equipos Scoop, para el caso de los equipos Jumbo no se acepta ninguna distribución de probabilidad.

**Tabla 21. Distribuciones de probabilidad - Equipos Jumbo**

distribution	rank	acceptance
Pearson 6(0, 1.73, 4.21, 1.16)	0.628	reject
Pearson 5(0, 0.931, 4.51)	0.0964	reject
Inverse Gaussian(0, 6.32, 20.7)	0.0941	reject
Exponential(0, 20.7)	0	reject
Gamma(0, 0.726, 28.6)	0	reject
Erlang(0, 1, 20.7)	0	reject
Lognormal(0, 2.2, 1.24)	0	reject
Uniform(0, 606)	0	reject
Beta(0, 828, 0.584, 18.5)	0	reject
Log-Logistic(0, 1.42, 8.46)	0	reject
Triangular(-1, 607, -0.102)	0	reject
Weibull(0, 0.724, 17.3)	0	reject
Pareto	no fit	reject

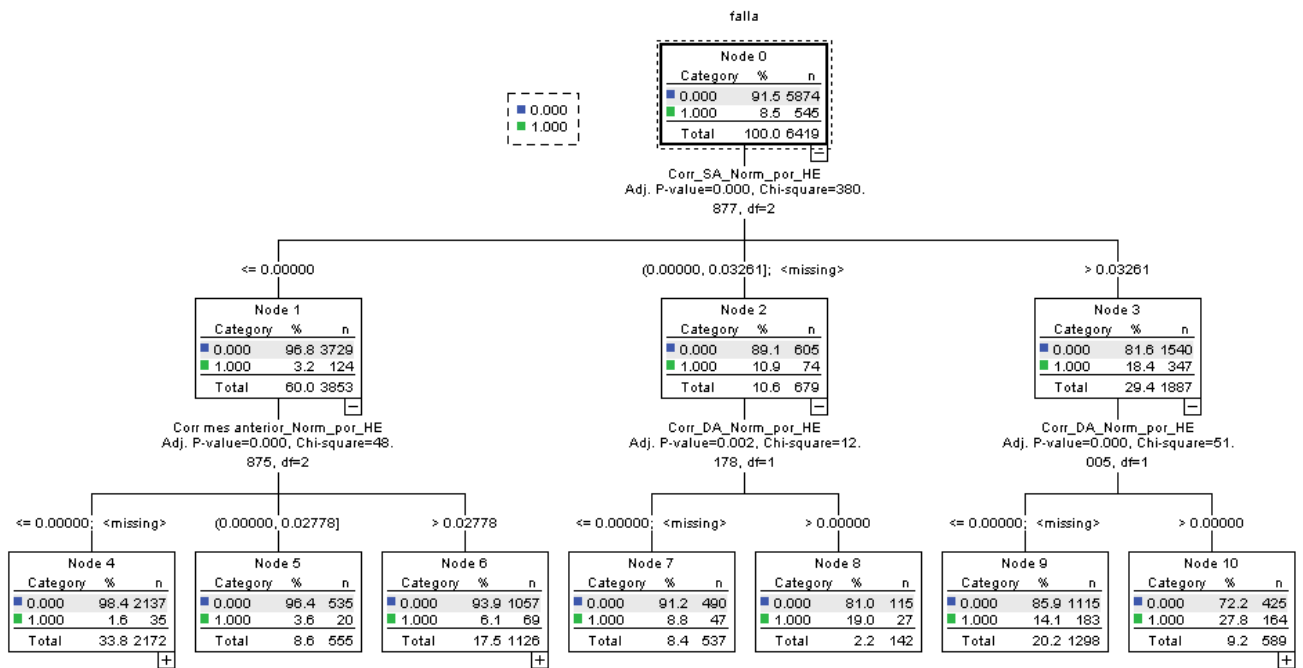
Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *jumbo*

Destaca el hecho que las distribuciones de probabilidad empeoran su ajuste en la medida que se analizan equipos de mayor complejidad en la obra. Esto explica en parte los excelentes ajustes observados en equipos *dumper*, el rechazo de distribuciones de *rank* elevados para el caso de los equipos *scoop* y un completo rechazo de distribuciones para el caso de los equipos *jumbo*.

#### 4.3.2 Árboles de Decisión - Equipos Jumbo

A partir de la base consolidada de registros de equipos *jumbo* se implementa un árbol de decisión, que permita determinar las variables significativas al momento de discriminar registros con fallas. El modelo completo de árbol de decisión se encuentra en la sección Anexos C.1.

## Ilustración 7. Árbol de Decisión - Equipo Jumbo



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *jumbo*

**Tabla 22. Códigos de variables - Árbol de decisión - Equipos Scoop<sup>10</sup>**

Código	Significado
Corr_SA_Norm_por_HE	Horas correctivas observadas durante la semana anterior, normalizadas por horas efectivas.
Corr_mes_anterior_Norm_por_HE	Número de horas correctivas observadas durante el mes anterior, normalizadas por horas efectivas.
Corr_DA_Norm_por_HE	Horas correctivas observadas durante el día anterior, normalizadas por horas efectivas.

Fuente: Elaboración propia

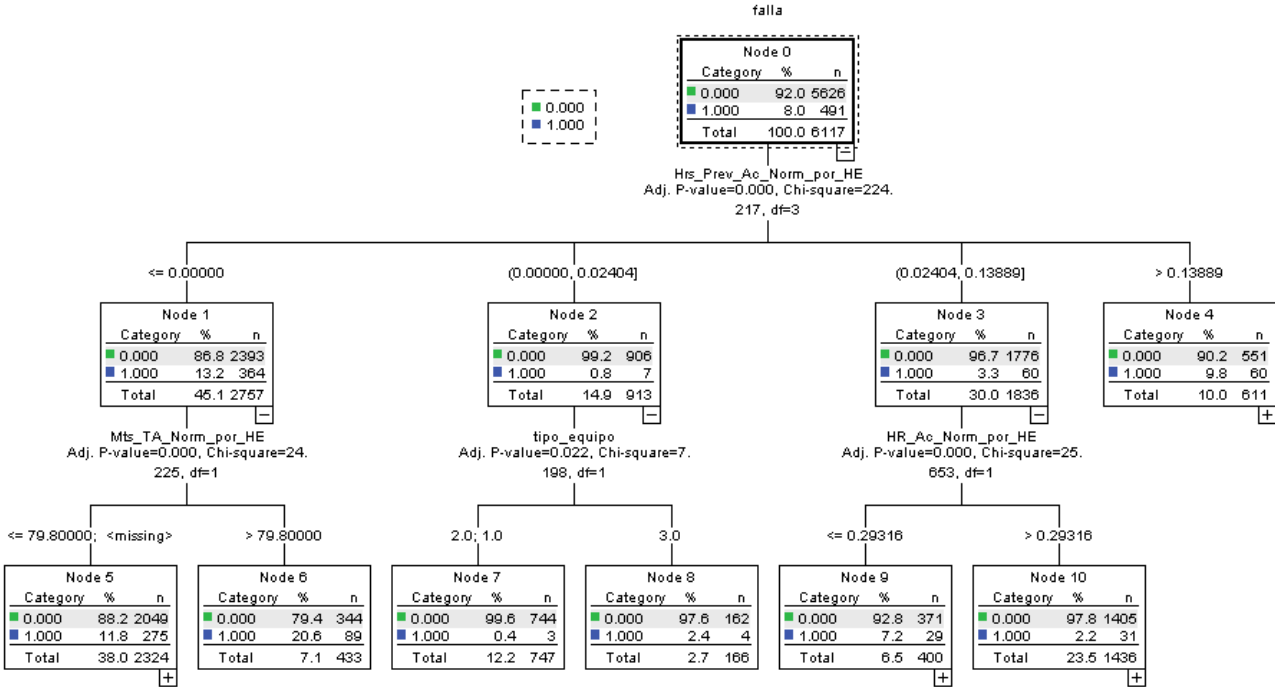
Al igual que en los equipos anteriores, los equipos *jumbo* presentan una fuerte dependencia de las horas correctivas realizadas durante la semana anterior. Se observa un aumento constante de la proporción de fallas del equipo en la medida que presenta mayor número de horas correctivas. El segundo nivel del árbol mantiene este tipo de variables, seleccionando las horas correctivas observadas durante el mes y día anterior, aumentando la proporción de fallas en la medida que aumentan las horas de falla.

<sup>10</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.

A partir del tercer nivel el modelo selecciona variables interesantes. Las horas de mantenimiento preventivo acumulados del equipo, que reducen la proporción de fallas en la medida aumenten las horas preventivas realizadas. Los metros perforados acumulados del equipo también aparecen como una variable relevante, aumentando la probabilidad de falla a medida que el equipo de perforación aumenta su producción acumulada. La única variable que parece contradecir los resultados obtenidos en los equipos *dumper* y *scoop* corresponde a las horas correctivas del día anterior declaradas por el operario. Se observa una reducción de la proporción de fallas en la medida que el equipo ha fallado anteriormente. Si bien esta variable tiene sentido al reducir la probabilidad de falla si el equipo se ha encontrado detenido con anterioridad, corresponde a un caso aislado. La tendencia general del resto de los equipos es al aumento de la proporción de falla en la medida que aumentan las horas correctivas anteriores.

Al igual que en los equipos anteriores, el análisis se repite sin considerar las variables de horas correctivas anteriores. De esta forma es posible analizar el resto de las variables que explican la ocurrencia de intervenciones correctivas.

**Ilustración 8. Árbol de Decisión sin horas correctivas - Equipo Jumbo**



Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *jumbo*

El detalle del árbol generado se encuentra en el Anexo C.2.

**Tabla 23. Códigos de variables - Árbol de decisión sin horas correctivas - Equipos Scoop<sup>11</sup>**

Código	Significado
Hrs_Prev_Ac_Norm_por_HE	Horas preventivas acumuladas desde el último evento <sup>12</sup> registrado, normalizadas por horas efectivas.
Mts_TA_Norm_por_HE	Metros registrados en el turno anterior, normalizadas por horas efectivas.
tipo_equipo	Tipo de equipo de acuerdo a la antigüedad del equipo. Antigüedad se define de acuerdo al primer horómetro registrad.
HR_Ac_Norm_por_HE	Horas de reserva acumuladas, normalizadas por horas efectivas registradas.

Fuente: Elaboración propia

A partir de este árbol, se observa la influencia de la variable de horas de mantenimiento preventivo acumulado. Si bien la reducción no es constante, se observa una tendencia a la baja de la proporción de fallas en la medida que aumentan las horas de mantenimiento realizados al equipo.

El segundo nivel del árbol destaca por contar variables de producción, tipo de equipo y horas de reserva. La primera presenta un aumento de la probabilidad de falla en la medida que aumenta los metros perforados por el equipo. Si bien la influencia es leve, el equipo tipo 3 aumenta la proporción de fallas observadas. Este resultado tiene sentido dado que el equipo tipo corresponden a los equipos de mayor antigüedad según su horómetro. Finalmente, las horas de reserva del equipo reducen considerablemente la proporción observada de fallas.

El tercer nivel del árbol presenta variables de utilización, mantención final, producción en metros y disponibilidad de los equipos. Por un lado, las variables de utilización, producción en metros y disponibilidad presentan un aumento de la probabilidad de falla a medida que aumentan su valor. Destaca el comportamiento de la variable de disponibilidad, que aumenta la probabilidad de falla en la medida que el equipo se ha encontrado con mayor disponibilidad para operar en el pasado, contradiciendo el comportamiento de los equipos *dumper*. La variable de mantención final reduce la proporción observada de fallas.

A partir del análisis descriptivo de los equipos de perforación, se observa nuevamente la aparición de variables de horas correctivas, las cuales corresponden a las variables de mayor significancia a la hora de predecir la ocurrencia de intervenciones correctivas. Las variables de mantenimiento preventivo solo cobran significancia cuando se obvian las variables de horas correctivas anteriores. Esta dependencia de fallas anteriores puede explicarse, al igual que para el caso de los equipos *dumper* y *scoop*, por un bajo desempeño de los equipos de reparación o una priorización de las tareas productivas por sobre las de mantención. Sin embargo, dada

<sup>11</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.

<sup>12</sup> Por evento se entiende una mantención correctiva o preventiva.

las variables utilizadas, el modelo no es capaz de determinar la causa principal de este fenómeno.

### 4.3.3 Análisis Predictivo

Para el caso de los equipos *jumbo* se desarrolla la misma metodología que para los equipos *scoop*. Se implementan modelos de Regresión Logística con el método *Forward Conditional* y *Support Vector Machine* lineal. Los modelos se entrenan sobre un 80% de los registros, testeándose sobre el 20% restante. Para comparar los modelos implementados, se fija un *threshold* de 0.25 y se obtienen sus medidas de desempeño.

**Tabla 24. Medidas de desempeño - Equipos Jumbo**

Escenarios	Regresión Logística	Support Vector Machine
Proporción Inicial	9%	7.92%
Precisión	25.8%	7.6%
Recall	10.6%	62.1%
F-measure	15%	13.5%

Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *jumbo*

Si bien el desempeño del modelo *Support Vector Machine* aumenta con respecto al análisis de los equipos *scoop*, no es suficiente para superar el modelo de Regresión Logística. Al igual que para las palas de bajo perfil, el modelo SVM presenta altos niveles de *recall*, pero un nivel de precisión de tal solo 7.6%. El modelo de regresión en cambio, presenta desempeño equilibrado, con un nivel de precisión y *recall* de 25% y 10% respectivamente.

**Tabla 25. Variables seleccionadas Regresión Logística - Equipos Jumbo**

	B	Sig.	Exp(B)
Step 8 <sup>h</sup> HR_Ac_Norm_por_HE_Max1	-7.817	.037	.000
Metros_SA_Norm_por_HE_Max1	3.609	.000	36.935
Corr_TA_Norm_por_HE_Max1	-48.512	.000	.000
Corr_DA_Norm_por_HE_Max1	55.099	.000	8.497E23
obra_1641	-1.029	.000	.357
obra_1642	-.379	.020	.685
mec_2	.464	.000	1.590
turno_B	-1.078	.000	.340
Constant	-2.328	.000	.097

Fuente: Elaboración propia a partir de base consolidada de equipos *jumbo*

**Tabla 26. Códigos de variables - Regresión Logística - Equipos Jumbo<sup>13</sup>**

Código	Significado
HR_Ac_Norm_por_HE_Max1	Horas de reserve acumuladas desde el último evento registrado <sup>14</sup> , normalizadas por horas efectivas de trabajo y normalizadas nuevamente para tener valores entre 0 y 1.
Metros_SA_Norm_por_HE_Max1	Producción del equipo en metros perforados durante la semana anterior. Variable se encuentra normalizada por horas efectivas de trabajo y normalizada nuevamente para tener valores entre 0 y 1.
Corr_TA_Norm_por_HE_Max1	Horas correctivas durante el turno anterior, normalizadas por horas efectivas de trabajo y normalizadas para tener valores entre 0 y 1.
Corr_DA_Norm_por_HE_Max1	Horas correctivas durante el día anterior, normalizadas por horas efectivas de trabajo y normalizadas para tener valores entre 0 y 1.
Obra_1641	Variable binaria con valor 1 si el equipo trabaja en la obra 1641 y 0 en caso contrario.
Obra_1642	Variable binaria con valor 1 si el equipo trabaja en la obra 1642 y 0 en caso contrario.
Mec_2	Variable binaria con valor 1 si el equipo es reparado por un mecánico tipo 2, 0 en caso contrario.
Turno_B	Variable binaria con valor 1 si el registro corresponde a una jornada de trabajo diurno, 0 en caso contrario.

Fuente: Elaboración propia

A partir de la Tabla 25 se observa los principales componentes del modelo de regresión logística. La columna 'B' representa la constante de regresión de cada una de las variables, 'Sig' la significancia de la variable y 'Exp(B)' el valor de la exponencial evaluada en la columna 'B'.

<sup>13</sup> Detalle de códigos utilizados en Anexo A.

<sup>14</sup> Por evento se entiende una intervención correctiva o preventiva.

A partir del modelo de Regresión Logística se observa una fuerte influencia de variables de horas correctivas. Si bien las horas correctivas del turno anterior reducen la probabilidad de falla de un registro, el efecto neto considerando las horas del día anterior es positivo, favoreciendo la ocurrencia de intervenciones correctivas. En menor medida, las horas de reserva y metros de perforación durante la semana anterior reducen y aumentan la probabilidad de falla respectivamente. Las variables de obra 1641, obra 1642 y turno diurno, reducen levemente la probabilidad de falla de un equipo. El mecánico tipo 2, que corresponde al mecánico con tiempo de reparación medio, aumenta insignificamente la probabilidad de falla.

Si bien no se cuentan con variables de mantención preventiva, a partir del modelo es posible realizar escenarios de producción y descanso de los equipos, que permitan obtener distintas probabilidades de falla. De esta forma, podemos determinar un intervalo alternativo de mantención a partir de un límite máximo de producción.

#### 4.4 Análisis Resultados

El detalle de los modelos implementados para cada equipo se resume en la siguiente tabla.

**Tabla 27. Resumen de indicador *F-measure* para modelos predictivos**

Escenarios	Distribución de Probabilidad	Árbol de Decisión	Regresión Logística	Support vector Machine
Dumper	10%	-	-	-
Scoop	-	23.9%	13.3%	7.5%
Jumbo	-	28.8%	15.5%	13.5%

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de modelos predictivos

A partir de la Tabla 27 se observa una fuerte predominancia de los modelos de árbol de decisión, logrando los mejores desempeños en 2 de los 3 equipos en estudio. La única excepción corresponde a los equipos *dumper*, en el que el árbol no logra superar el *threshold* definido de comparación.

Dado que los porcentajes iniciales de falla se encuentran en torno al 5% del total de registros, puede ser interesante una selección de modelos en base a la precisión.

**Tabla 28. Resumen de indicador de precisión para modelos predictivos**

Escenarios	Distribución de Probabilidad	Árbol de Decisión	Regresión Logística	Support vector Machine
Dumper	5.1%	-	-	-
Scoop	-	25%	30%	4.3%
Jumbo	-	29.9%	25.8%	7.6%

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de modelos predictivos

Considerando la precisión como la medida de selección, la distribución de probabilidad y árbol de decisión se mantienen para los equipos *dumper* y *jumbo* respectivamente. Para el caso de los equipos *scoop* la regresión logística surge como la mejor alternativa.

Con la salvedad de los equipos *dumper* los equipos presentan precisiones interesantes, alcanzando valores cercanos al 30%. Si bien este valor puede parecer reducido, los modelos predictivos logran una mejora importante con respecto a la proporción de fallas inicial, la cual ronda el 5%.

A partir de los modelos obtenidos, es posible determinar la predicción que mejor se ajuste a las necesidades de la empresa constructora. Para el caso de los equipos *dumper* la distribución de probabilidad surge como la mejor alternativa de predicción, dado el bajo ajuste presentado por el árbol de decisión. Para el caso de los equipos *scoop*, la empresa puede priorizar la precisión y escoger el modelo de regresión logística o bien el modelo de árbol de decisión, que presenta un equilibrio interesante entre precisión y *recall*. Para el caso de los *jumbo* la mejor alternativa corresponde al árbol de decisión, que obtiene mayores niveles de *f-measure* y precisión frente al resto de los modelos.

Otro análisis importante tiene relación con el porcentaje de fallas identificados por los modelos con mejor *F-Measure*. De esta forma, es posible identificar los ahorros potenciales de implementar los modelos predictivos desarrollados. En la siguiente tabla se detallan los indicadores *recall* de los modelos, destacando en negrita los modelos de mejor desempeño.



**Tabla 29. Resumen de indicador de *recall* para modelos predictivos**

<b>Escenarios</b>	<b>Distribución de Probabilidad</b>	<b>Árbol de Decisión</b>	<b>Regresión Logística</b>	<b>Support vector Machine</b>
Dumper	<b>76.5%</b>	-	-	-
Scoop	-	<b>22.9%</b>	8.5%	64%
Jumbo	-	<b>27.9%</b>	10.6%	62.8%

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de modelos predictivos

Dado que el *recall* corresponde al porcentaje de fallas identificadas dentro de la base de datos, es posible estimar eficiencias sobre el consumo de repuestos y reparaciones. Dado que un porcentaje de las fallas correctivas son predichas con antelación, el costo de una acción correctiva pasa a ser una preventiva. Se realizan los siguientes supuestos.

- El 70% del gasto en repuestos es destinado a mantenimiento correctivo
- Un mantenimiento preventivo corresponde, en un escenario pesimista a un 80% del costo correctivo.
- El modelo logra identificar un porcentaje de fallas equivalente al indicador de *recall*.

Bajo estos supuestos, una eventual implementación de los modelos predictivos produce ahorros por un total de 16,750 unidades monetarias, las cuales corresponden a un ahorro del 4% del total de gastos en repuestos y reparaciones. Cabe destacar que esta estimación solo ha considerado ahorros en repuestos y reparaciones, sin considerar beneficios por eventuales mejoras de la disponibilidad física, ahorros de mano de obra, entre otros.

Dado el nivel de ahorro al que puede acceder la empresa constructora, resulta interesante incorporar nuevas variables explicativas que permitan mejorar los niveles de precisión y *recall*. De esta forma la empresa no solo puede acceder a un mayor nivel de ahorro, sino que también mejorar los niveles de precisión y con ello reducir el número de predicciones incorrectas, que finalmente se traduce en detener innecesariamente un equipo.

## Capítulo 5: Escenarios Operacionales

A partir de los modelos predictivos determinados en el capítulo 4 se busca definir intervalos de mantenimiento preventivo, considerando disponibilidad y beneficio esperado de cada política. Por motivos de confidencialidad de información todos los montos han sido divididos por una constante, de forma que los resultados se obtienen en unidades monetarias (u.m.).

Para el caso de los equipos *dumper*, donde se logra el ajuste de distribuciones de probabilidad, se obtiene vía simulación el número esperado de fallas durante un intervalo de trabajo. Para el caso de los equipos *scoop* y *jumbo*, donde se aplican modelos de minería de datos, se busca determinar límites máximos de producción por equipo. Esta solución alternativa se adopta dado que los modelos seleccionan variables de producción y de falla por sobre las variables de mantención. Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con los intervalos actuales de la empresa constructora.

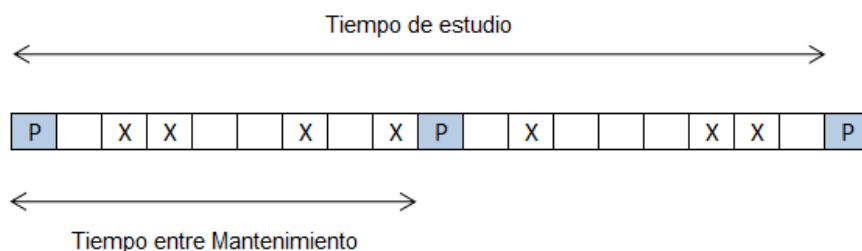
### 5.1 Equipos Dumper

A partir de las distribuciones de probabilidad obtenidas se realiza una simulación de escenarios considerando beneficios, costos promedio de producción y reparación. Cada escenario corresponde un número de horas efectivas entre actividades de mantenimiento preventivo. Durante este intervalo, el equipo obtiene un beneficio de acuerdo a su tarifa variable y costos, de acuerdo a sus mantenciones correctivas.

El número de mantenciones correctivas esperadas se determina por medio de una simulación utilizando el complemento de Excel Crystal Ball, adaptando la metodología desarrollada por Kobbacy, Fawzy, Percy y Ascher [17].

Cada escenario comienza con un mantenimiento preventivo, actividad que supone una restauración completa del equipo.

**Ilustración 9. Esquema de análisis - Equipos Dumper**



Fuente: Elaboración propia

A partir de la ilustración 9 se observa un ejemplo del esquema de análisis realizado, donde los bloques ‘P’ representan actividades de mantenimiento preventivo y los bloques ‘X’ potenciales mantenciones correctivas. El periodo en estudio se divide en bloques de acuerdo al tiempo entre mantenimientos, mientras que el número de mantenciones correctivas se determina mediante una simulación de distribuciones de probabilidad. El intervalo entre el mantenimiento preventivo y la primera falla se determina mediante una distribución normal promedio 27.45 y desviación estándar 36.24, restringiendo la distribución para que solo entregue valores mayores iguales a cero. Para las fallas posteriores se utiliza una distribución lognormal (2.15, 1.31). Para cada simulación se realizan 1,000 escenarios de intervenciones correctivas.

En base a la tarifa variable por hora de trabajo, el beneficio de operación promedio, el costo de reparación promedio de una intervención preventiva y correctiva, y la duración de ambos tipos de intervenciones, se realiza un análisis de beneficio y disponibilidad para cada “ciclo” en el que se divide el periodo de estudio.

**Tabla 30. Parámetros simulación - Equipo Dumper**

Registro	Valor	Unidad
Beneficio por hora <sup>15</sup>	7	u.m.
Costo intervención correctiva	166	u.m.
Costo intervención preventiva	47	u.m.
Duración intervención correctiva	3.8	horas
Duración intervención preventiva	3.7	horas

Fuente: Elaboración propia a partir de datos equipos *dumper*

*Beneficio Esperado*

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Ingreso Ciclo} - \text{Costo Ciclo}) \times \text{Número de Ciclos} \\
 &- \text{Costo Mantenimiento Preventivo} \times \text{Número de Ciclos} \\
 &- \text{Horas Esperadas de Falla} \times \text{Beneficio por Hora} \\
 &- \text{Horas de Mantenimiento} \times \text{Beneficio por Hora}
 \end{aligned}$$

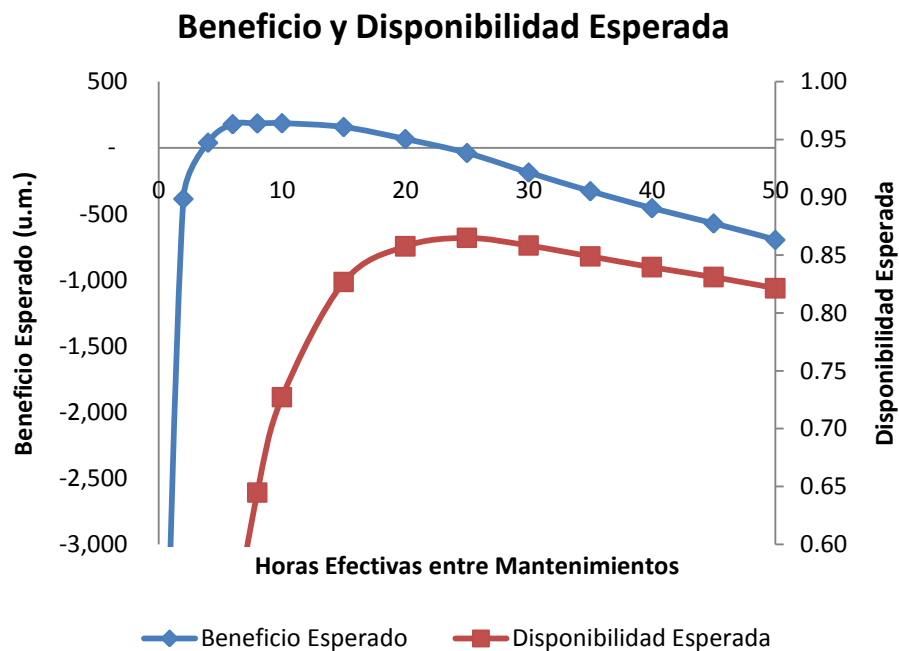
Donde Ingreso Ciclo corresponde al beneficio del equipo multiplicado por sus horas esperadas de trabajo, Costo Ciclo corresponde al número esperado de fallas multiplicado por el costo de una mantención correctiva. Restando ambos valores se obtiene el beneficio de ciclo, valor que al multiplicar por el número de ciclos permite obtener el beneficio del período de estudio.

<sup>15</sup> Obtenido a partir del margen promedio de trabajo por equipo.

La multiplicación de Costo de Mantenimiento Preventivo y Número de Ciclos permite obtener el costo de implementar la política de intervenciones durante el período de estudio.

Finalmente, la multiplicación de las Horas Esperadas de Falla y Horas de Mantenimiento con el Beneficio por Hora permite obtener el costo de oportunidad de debido a la detención de los equipos. Este costo incluye tanto las detenciones esperadas como las de mantenimiento preventivo.

**Gráfico 11. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Dumper**

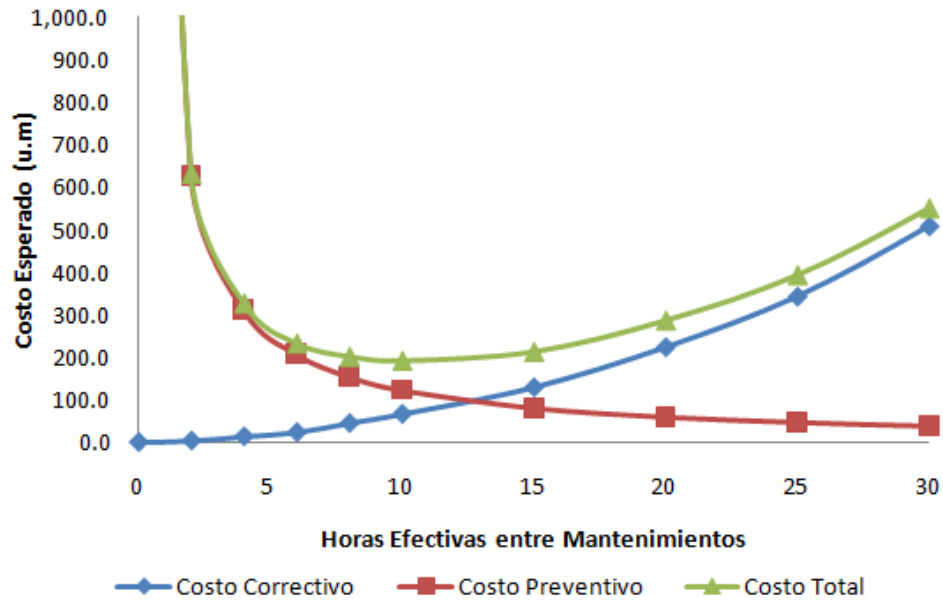


Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos *dumper*

A partir del Gráfico 11 se observa un comportamiento creciente de la disponibilidad esperada del equipo, alcanzando un máximo en las 25 horas efectivas. Un comportamiento similar presente el beneficio esperado, alcanzando un máximo a las 10 horas de trabajo efectivo.

Para el caso de los costos de reparación, se observa un comportamiento cóncavo, alcanzando un mínimo en torno al intervalo de 10 horas de trabajo efectivo.

**Gráfico 12. Relación mantenimiento correctivo y preventivo - Equipos Dumper**



Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos *dumper*

Este análisis entrega tres resultados relevantes. La maximización de beneficios sin importar la disponibilidad, la maximización de beneficios sujeto al cumplimiento de disponibilidad y la maximización de disponibilidad. Para el primer caso, una política de mantenimiento preventivo cada 10 horas efectivas de trabajo permite maximizar el beneficio esperado con 184 unidades monetarias y una disponibilidad esperada de 72.7%. El segundo resultado corresponde a una mantención cada 20 horas efectivas de trabajo, punto que permite superar levemente el 85% de disponibilidad y obtener un beneficio de 65 unidades monetarias. Finalmente, el punto que maximiza la disponibilidad esperada corresponde a mantenciones cada 25 horas efectivas de trabajo, donde se obtiene un beneficio esperado de -40 unidades monetarias y una disponibilidad de 86.5%.

**Tabla 31. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Dumper**

<b>Escenario</b>	<b>Horas efectivas entre intervenciones</b>	<b>Beneficio Esperado (u.m.)</b>	<b>Disponibilidad esperada</b>
Escenario Actual	48	-635	82.6%
Maximización de Beneficios	10	184	72.7%
Maximización de Beneficios sujeto a disponibilidad	20	65	85.8%
Maximización de Disponibilidad	25	-40	86.5%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos *dumper*

A partir de la Tabla 31 se observan eficiencias importantes a partir de la reducción de los plazos de mantenimiento preventivo. Para todos los escenarios seleccionados se observan intervalos de mantenimiento por debajo del promedio actual de la empresa. Una reducción de 23 horas efectivas entre las intervenciones preventivas realizadas permite maximizar la disponibilidad esperada y aumentar el beneficio esperado en cerca de 600 unidades monetarias.

Considerando que un equipo *dumper* trabaja en promedio 3.8 horas efectivas por día, el plazo de mantenciones actual de la empresa corresponde a 12.6 días. La maximización de disponibilidad física en cambio, se alcanza en la medida que el equipo recibe actividades de mantención cada 6.5 días.

La diferencia en el beneficio esperado puede explicarse por la construcción del modelo, que al asumir una distribución con una media de 2 horas castiga fuertemente las 48 horas de trabajo del escenario actual. La confiabilidad del modelo se sustenta en el número de intervenciones utilizadas para su construcción. De las 76 intervenciones registradas inicialmente<sup>16</sup>, 48 son utilizadas para construir la distribución. Esto corresponde al 63% de la información inicial disponible. Si bien los ahorros difícilmente serán de los órdenes de magnitud descritos por el modelo, los resultados muestran la existencia de eficiencias en caso de reducir los intervalos de mantención.

<sup>16</sup> Tabla 7, página 23.

## 5.2 Equipos Scoop

A partir del modelo de regresión logística se construyen distintos escenarios de operación, modificando la variable de paladas durante la semana anterior. Dado que el modelo no entrega dependencia alguna de variables relacionadas con el mantenimiento preventivo de equipos, se busca determinar un límite máximo de producción para el equipo. De esta forma podemos definir la política de mantenimiento preventivo con intervenciones cada vez que el equipo alcance el nivel productivo máximo.

Si bien el modelo de Regresión Logística determina 6 variables de interés, solo se utilizan las 2 variables de mayor importancia en el modelo<sup>17</sup>. El modelo se construye a partir de 'Pal\_SA\_Norm\_por\_HE\_Max1' y 'Corr\_SA\_Norm\_por\_HE\_Max1', las cuales permiten obtener la probabilidad de falla de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$Prob(falla) = \frac{e^X}{1 + e^X}$$

Donde X representa la ecuación.

$$X = 2.15 \times Pal\_SA\_Norm\_por\_HE\_Max1 + 6.59 \times Corr\_SA\_Norm\_por\_HE\_Max1 + 2.92$$

A partir de esta ecuación, es posible realizar un análisis de la variable de producción en paladas durante la semana anterior, que permite minimizar la probabilidad de falla del siguiente turno. De esta forma, la probabilidad de falla se calcula desde 0 hasta 1,800 paladas de producción durante la semana anterior. Para el caso de la variable de horas correctivas durante la semana anterior, se utiliza el promedio histórico observado para los equipos de interés. El resto de las variables no son consideradas en el análisis, reemplazándose por un valor constante igual a 0. De esta forma se busca aislar sus efectos sobre la probabilidad de falla.

Dada una producción semanal, es posible obtener un beneficio y costo esperado para el turno siguiente, a partir de la probabilidad de falla entregada por el modelo. El beneficio promedio se obtiene mediante la producción promedio de la semana anterior, mientras que los costos se determinan por el costo promedio de una detención correctiva. La ecuación utilizada es la siguiente.

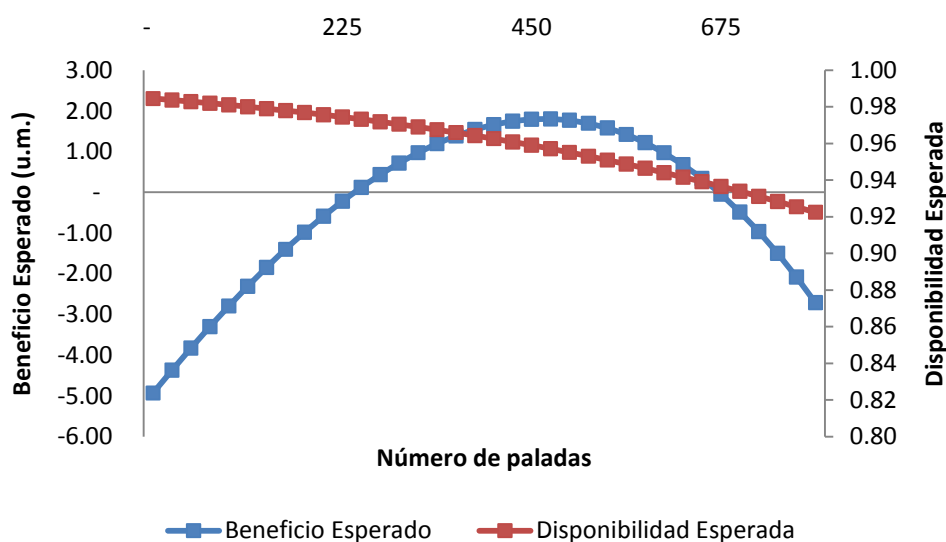
*Beneficio Esperado*

$$\begin{aligned} &= (1 - P(falla)) \times Producción\ promedio\ por\ turno \times Beneficio\ por\ palada \\ &\quad - P(falla) \times Costo\ intervención\ correctiva \\ &\quad - P(falla) \times Duración\ intervención\ correctiva \times Beneficio\ por\ hora \end{aligned}$$

---

<sup>17</sup> Tabla 19, página 41.

**Gráfico 13. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Scoop**



Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos scoop

A partir del Gráfico 13 se observa un aumento progresivo del beneficio esperado, alcanzando un máximo de 1.8 unidades monetarias en 473 paladas semanales. Este resultado se encuentra considerablemente por sobre la producción promedio semanal observada de 128 paladas, pero inferior a la producción máxima registrada de 609 paladas. Estos resultados indican que la constructora se encuentra actualmente en niveles cercanos al óptimo obtenido.

La disponibilidad presenta un comportamiento decreciente a medida que aumenta la probabilidad de falla del equipo, pero manteniéndose por sobre el límite requerido.

**Tabla 32. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Scoop**

Escenario	Producción semanal (Paladas por semana)	Beneficio Esperado (u.m.)	Disponibilidad esperada
Escenario Actual	484	1.7	95.6%
Maximización de Beneficios	473	1.8	95.3%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos scoop

La Tabla 32 presenta la situación actual de la empresa y modelo predictivo implementado. Si bien el modelo indica un aumento del beneficio esperado reduciendo el intervalo entre mantenciones preventivas, las diferencias tanto en beneficio y disponibilidad esperada son mínimas.



### 5.3 Equipos Jumbo

Al igual que para el caso del equipo *scoop*, a partir de la Regresión Logística se obtiene una función de probabilidad que depende de 8 variables<sup>18</sup>, de las cuales se seleccionan las primeras 4 de acuerdo a su significancia en el modelo. De esta forma se obtiene una función de probabilidad que depende de las horas de reserva acumuladas por el equipo, producción en metros durante la semana anterior, horas de mantención correctiva durante el turno y día anterior.

$$Prob(falla) = \frac{e^X}{1 + e^X}$$

Donde X equivale a la siguiente ecuación.

$$X = -7.82 \times HR\_Ac\_Norm\_por\_HE\_Max1 + 3.61 \times Metros\_SA\_Norm\_por\_HE\_Max1 \\ - 48.51 \times Corr\_TA\_Norm\_por\_HE\_Max1 + 55.1 \times Corr\_DA\_Norm\_por\_HE\_Max - 2.33$$

A partir de esta ecuación es posible analizar el efecto de distintos niveles productivos durante la semana anterior, buscando obtener un límite máximo de perforación para los equipos *jumbo*, que permita contar con una operación eficiente en términos de beneficio y disponibilidad física.

La variación de los metros perforados durante la semana anterior permite analizar distintos escenarios productivos de los equipos. De esta forma, se obtiene la probabilidad de que el equipo requiera una mantención correctiva para niveles de producción desde 250 hasta 9,900 metros semanalmente. Para el caso de las variables de horas de reserva, horas correctivas del turno y día anterior, se utiliza un promedio histórico a partir de los registros. El resto de las variables del modelo se dejan con una constante 0 para eliminar su efecto.

A partir de los tiempos y costos de intervenciones correctivas se calcula el beneficio y disponibilidad esperada. La ecuación utilizada es equivalente a la de los equipos *scoop*.

*Beneficio Esperado*

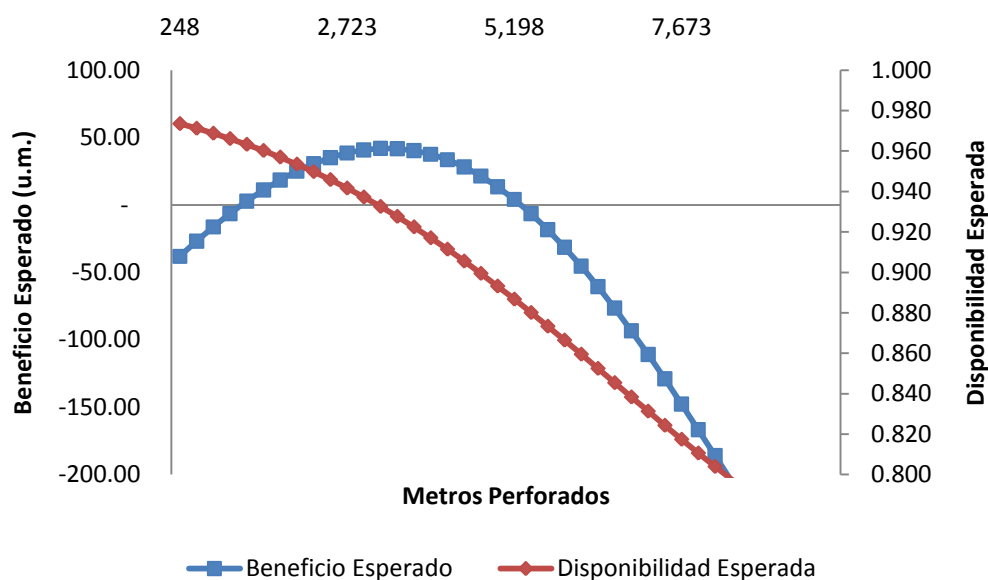
$$= (1 - P(falla)) \times Producción\ promedio\ por\ turno \times Beneficio\ por\ metro \\ - P(falla) \times Costo\ intervención\ correctiva \\ - P(falla) \times Duración\ intervención\ correctiva \times Beneficio\ por\ hora$$

A partir de esta ecuación, se obtienen los siguientes resultados.

---

<sup>18</sup> Tabla 25, página 48.

**Gráfico 14. Beneficio y disponibilidad esperada - Equipos Jumbo**



Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos *jumbo*

A partir de la simulación realizada, se observa un alza progresiva del beneficio esperado al aumenta el nivel productivo semanal, alcanzando un máximo en los 3,218 metros de perforación. Este punto además cumple con los límites de disponibilidad requeridos por la empresa, con un 95% de disponibilidad esperada.

Al igual que para el caso de los equipos *scoop*, este límite máximo de producción se encuentra por sobre la producción semanal promedio de 1,909 metros, pero se encuentra por debajo de la producción máxima observada de 4,890 metros.

**Tabla 33. Resumen de resultados obtenidos - Equipos Jumbo**

Escenario	Producción semanal (Metros por semana)	Beneficio Esperado (u.m.)	Disponibilidad esperada
Escenario Actual	2,680	36.86	94.4%
Maximización de Beneficios	2,970	41.9	93%

Fuente: Elaboración propia a partir de registros consolidados de equipos *jumbo*

En base al escenario de producción óptimo es posible obtener la probabilidad de falla objetivo a la cual la empresa debiera trabajar, equivalente a 0.22.

Un segundo resultado interesante se obtiene al variar tanto la producción semanal del equipo como las horas de reserva acumuladas, lo que permite obtener una matriz de probabilidades de falla para distintos niveles de metros perforados y horas de reserva. Al igual que en el ejercicio anterior, para las variables de horas correctivas se utiliza información histórica y las variables menores como equipo y obra se eliminan del análisis. La matriz de probabilidades completa se encuentra en la sección Anexos D.

**Tabla 34. Matriz de probabilidades - Metros semana anterior y horas de reserva**

		HR_Ac_Norm_por_HE			
		0	0.2	0.4	0.6
Metros_SA	0	0.174	0.170	0.167	0.164
	100	0.179	0.176	0.172	0.169
	200	0.185	0.181	0.178	0.174
	300	0.190	0.187	0.183	0.179
	400	0.196	0.192	0.189	0.185
	500	0.202	0.198	0.194	0.191
	600	0.208	0.204	0.200	0.196
	700	0.214	0.210	0.206	0.202

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de modelos predictivos equipos *jumbo*

Considerando la probabilidad de falla de 0.22 obtenida mediante la Regresión Logística, la unidad de operaciones debiese asignar un descanso tal que permita trabajar en niveles cercanos a este valor.

A partir de la Tabla 34 es posible determinar planes de producción para el equipo. Dada una meta productiva de 500 metros para la semana, la empresa constructora debiese dar horas de reservas equivalentes al 20% de las horas efectivas asignadas con tal de reducir la probabilidad de falla del equipo al término del período.

Asumiendo una velocidad de perforación constante por hora, es posible estimar el nivel de descanso del equipo de perforación. De esta forma, para una producción promedio de 56 metros por hora, es posible modificar la Tabla 34.

**Tabla 35. Matriz de probabilidades - Horas efectivas semana anterior y horas de reserva**

		HR_Ac_Norm_por_HE			
		0	0.2	0.4	0.6
Horas Efectiva_SA	0	0.174	0.170	0.167	0.164
	1.8	0.179	0.176	0.172	0.169
	3.6	0.185	0.181	0.178	0.174
	5.4	0.190	0.187	0.183	0.179
	7.1	0.196	0.192	0.189	0.185
	8.9	0.202	0.198	0.194	0.191
	10.7	0.208	0.204	0.200	0.196
	12.5	0.214	0.210	0.206	0.202

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados de modelos predictivos equipos *jumbo*

Tomando el mismo ejemplo anterior, una producción de 500 metros semanales requiere en promedio cerca de 9 horas de trabajo efectivo. De esta forma, para mantener la probabilidad de falla por debajo de 0.2 se requiere mantener a lo menos 1.8 horas de reserva para el equipo.

#### 5.4 Análisis Resultados

Para cada uno de los equipos se determinan intervalos eficientes de mantenimiento preventivo. Los resultados principales se resumen en la tabla a continuación.

**Tabla 36. Resumen intervalos entre mantención preventiva**

Escenario	Intervalo Actual	Intervalo Modelo
Dumper	48 HE	25 HE
Scoop	484 paladas	473 paladas
Jumbo	2,680 metros	2970 metros

Fuente: Elaboración propia a partir de bases consolidadas de equipos

Salvo los equipos *jumbo*, los resultados tienden a reducir los intervalos de mantenimiento preventivo de los equipos. Los equipos *dumper* presentan el cambio de mayor significancia. Pasando de 48 a 25 horas efectivas entre actividades preventivas, el modelo predictivo indica una reducción requerida de 48%. Para el caso de los equipos *scoop*, los resultados indican una leve reducción de los intervalos de mantención. Pasando de 484 a 473 paladas de producción, representa una baja del 3% con respecto al intervalo actual. Para el caso de los equipos *jumbo* se requiere un aumento de cerca de 300 metros perforados de producción, lo cual representa un aumento del 11%. Estos resultados se explican en parte por el comportamiento de los ingresos esperados, los cuales logran compensar los costos esperados por sufrir una detención correctiva durante la operación.

Destaca el hecho que la disponibilidad se encuentra siempre por sobre el mínimo requerido y presente diferencias importantes con respecto a la disponibilidad calculada inicialmente. Estos resultados se explican por diferencias entre los registros del operario y mecánico, los cuales impiden realizar una comparación directa. Considerando los equipos *jumbo* se observan diferencias considerables de las horas de mantenimiento preventivo y correctivo declaradas por el mecánico con aquellas declaradas por el operario. Si bien en algunos meses el mecánico puede llegar a declarar el doble de horas de mantenimiento preventivo y correctivo que el operario, en promedio el primero declara el 40% de las horas registradas por el operador. Un fenómeno similar ocurre en el caso de los equipos *dumper* y *scoop* donde el mecánico declara alrededor del 20% de la información entregada por el operario. El hecho que la información consolidada utilice menores horas de mantención puede explicar que disponibilidades obtenidas se encuentren por sobre el cálculo inicial.

Dado que el mecánico es el único encargado de intervenir el equipo para realizar mantenencias preventivas o correctivas, la disponibilidad obtenida a partir de sus registros debiera ser menor o igual a la disponibilidad calculada a partir de la información entregada por el operador. Con la información disponible actualmente, no es posible determinar si el operario se encuentra sobreestimando los períodos de mantenimiento o bien si el mecánico las ha subestimado. Las horas de mantenimiento pueden encontrarse eventualmente en un punto medio entre ambas fuentes de información.

Estas diferencias de información proporcionada por dos fuentes diferentes de la constructora indican la necesidad de consolidar los registros. Determinar cuál de las dos fuentes presenta mayores índices de confiabilidad puede ser realizado mediante inspecciones aleatorias en la obra de interés o bien mejorando el sistema de registros operacionales. En la medida que mejoren los sistemas de registro de información, la precisión y desempeño de los modelos predictivos debiese mejorar.

## Capítulo 6: Recomendaciones y Trabajos Futuros

A partir de los resultados obtenidos se proponen recomendaciones de mejora, como también nuevas líneas de trabajo que pueden ser de interés para futuros estudios con la empresa constructora.

### 6.1 Recomendaciones

Resulta necesaria una validación y consolidación de los registros de operario y mecánico dentro de la obra. Dado que el mecánico realiza las intervenciones correctivas y preventivas de los equipos, no es posible que sus registros sean distintos a los del operario. Esta diferencia puede provocar que el mecánico haya subestimado o sobreestimado la disponibilidad real del equipo. Un seguimiento aleatorio en terreno puede ayudar a obtener una muestra control con el cual comparar los registros obtenidos.

A partir del análisis de registros de intervenciones se recomienda estandarizar la clasificación de trabajos realizados, poniendo énfasis especial en reducir el número de registros clasificados como trabajos varios. Esta medida cobra mayor importancia en caso de realizar a futuro un análisis a nivel de componentes o subsistemas. Incorporar variables adicionales con respecto a la reparación, como si el trabajo fue realizado en el frente de trabajo o taller de obra. En este último caso, es posible incluir si el equipo llega por sus propios medios o tuvo que ser remolcado.

Dado que los modelos indican una dependencia fuerte entre fallas históricas observadas y probabilidad de falla futura. Se recomienda realizar un seguimiento de los equipos que han terminado recientemente una actividad de reparación, como también reducir sus cargas de trabajo, buscando evitar un colapso inmediato.

A partir de los modelos predictivos, se observa un aumento de la probabilidad de falla en la medida que un equipo *scoop* trabaje durante el turno A, correspondiente al turno diurno de la empresa. Este aumento es particularmente importante en equipos que presentan horas de mantención correctiva durante la semana anterior, pasando de 9.5 a 25% de probabilidad de falla. Un fenómeno similar se observa en los equipos *jumbo*, donde la probabilidad de falla se ve reducida si el equipo produce durante el turno B o turno nocturno. Para estos dos equipos, una revisión al comienzo de este turno puede ser beneficiosa si logra identificar una proporción importante de equipos en riesgo de falla antes de comenzar la jornada diurna.

Establecer un protocolo de mantenimientos preventivos, que permita el seguimiento y evaluación del número de pautas realizadas durante un periodo de tiempo. Estos indicadores pueden ser posteriormente incorporados a los modelos predictivos para analizar su significancia en la falla de los equipos críticos. Por ejemplo, en base a la producción mensual e intervalos de pautas de mantenimiento, es posible establecer un indicador mensual del tipo.

$$\text{Cumplimiento Mantenciones} = \frac{\text{Pautas Realizadas}}{\text{Pautas Teóricas Requeridas}}$$

El número de pautas teóricas requeridas puede ser determinado en base a las horas de trabajo efectivo o producción promedio durante un mes. A partir de este valor y el intervalo entre actividades de mantenimiento, ya sea el entregado por el proveedor o el determinado en el proyecto realizado, es posible determinar un número óptimo mensual sobre el cual establecer indicadores de cumplimiento. De la misma forma, es posible conformar un sistema de alerta temprana para aquellos equipos que se encuentran próximos a terminar su intervalo de producción establecido, es más, es posible realizar una predicción de la jornada futura en que un equipo debiese ser retirado del frente de producción. De esta forma, se hace posible una coordinación efectiva con el área de operaciones de la empresa, que debiese contar con el tiempo suficiente para coordinar un equipo de reemplazo y mantener los niveles productivos requeridos.

## **6.2 Trabajos Futuros**

Los niveles de ahorros estimados con los modelos actuales sientan una buena base para continuar y profundizar los estudios sobre los equipos productivos. A partir del trabajo realizado surgen distintas alternativas de profundización. Dependiendo de los objetivos de la compañía, es posible replicar esta metodología o bien incorporar nueva información al modelo. Una aplicación interesante puede resultar del análisis, por medio de la metodología implementada, en equipos de otras industrias.

Replicar la metodología por cada unidad productiva puede ser una alternativa atractiva para la empresa. Si bien aumentan los períodos de ajuste de los modelos predictivos, el resultado puede presentar mejoras importantes en cuanto a capacidad predictiva, dado que se pasa de un modelo general de toda la flota a distintos modelos particulares. Estos equipos pueden ser seleccionados en base a criterios especiales como número de fallas observado, máquina propia o arrendada, entre otros. Otra alternativa puede ser el análisis por componentes del equipo, permitiendo determinar la probabilidad de falla a nivel de piezas o subsistemas. A partir de este resultado, es posible obtener planes de reemplazo a nivel de repuestos, mejorando la planificación de intervenciones futuras. Además puede generar una base sólida para futuros estudios de inventarios para la empresa constructora, incorporando criterios como disponibilidad física de equipos, límite de presupuesto, etc.

En relación a la generación de fuentes de información puede ser interesante repetir el análisis incluyendo nuevas variables, que permitan mejorar los resultados obtenidos. En ese sentido la generación de información de mecánicos, metas productivas, tiempos de reparación, frentes de avance y órdenes de trabajo, pueden ser relevantes e influir en la falla de equipos.

Para el caso de los mecánicos, incorporar información que refleje su habilidad o experiencia es esencial para analizar el efecto de sus reparaciones en los equipos. Variables como edad, antigüedad en la empresa, capacitaciones o evaluaciones de sus conocimientos pueden ayudar a estimar su capacidad. Incorporar tiempos esperados de reparación por cada componente puede permitir estimar una medida de incumplimiento de la restauración del equipo, como también evaluar la prolijidad del mecánico a la hora de realizar su labor de reparación. Estos tiempos pueden ser generados por una opinión experta en el tema, agregando un delta para dar flexibilidad, o mediante un promedio de reparaciones realizadas. Otra variable interesante puede ser generada si el mecánico autoriza la operación del equipo al comienzo de la jornada de trabajo. De esta forma es posible medir la capacidad de inspección del trabajador, dependiendo si el equipo falla o no durante el turno de trabajo.

Incorporar antecedentes sobre las metas productivas de los equipos puede permitir la identificación de períodos de exigencia de los equipos. Esta información puede dar paso a un análisis de desempeños por debajo de la meta, buscando los factores que expliquen que un equipo no haya logrado su meta diaria.

Si bien el modelo incorpora sublocalizaciones de trabajo para cada uno de los equipos, resulta interesante la incorporación de los frentes de avance en los que ha trabajado el equipo, que permita la identificación de frentes conflictivos específicos. De la misma forma, incorporar información técnica especializada como muestras de aceite, temperatura o nivel de vibraciones puede ayudar a los modelos predictivos a mejorar sus precisiones.

Finalmente, incorporar la orden de trabajo en cada intervención realizada, preventiva o correctiva, puede ayudar a determinar el costo de cada actividad realizada. Sin embargo, su valor potencial es la asociación con la naturaleza de los componentes. De esta forma, es posible evaluar el efecto que tiene el uso de repuestos alternativos o reparaciones propias en cada uno de los equipos.

La aplicación en otras industrias es posible en la medida que se mantengan registros similares a los utilizados a lo largo del proyecto. Mientras una empresa mantenga registros de operación y productividad de sus equipos, operarios a cargo de su manejo y registros de las reparaciones realizadas, será posible realizar un estudio análogo. A priori, industrias productivas o transporte, pueden ser alternativas interesantes para ampliar el mercado potencial.



## Capítulo 7: Conclusiones

Uno de los resultados principales del proyecto corresponde a la dependencia de las detenciones futuras en las reparaciones correctivas históricas de los 3 tipos de equipo. El hecho que la probabilidad de falla del equipo aumente con la cercanía de la última reparación habla de una baja capacidad de restauración de las máquinas en operación. Este fenómeno puede explicarse por un bajo desempeño de los equipos de reparación, una priorización de labores productivas en desmedro de las mantenciones preventivas y las técnicas de reparación actuales, que impiden a los mecánicos detectar y reparar de manera eficiente los desperfectos.

Dada la información disponible, no es posible determinar a ciencia cierta qué factor es el principal responsable de los bajos niveles de restauración. Es necesario que la unidad normalice las actividades de reparación, base sobre la cual sea posible realizar un análisis posterior. Para a ello, incluir nuevas variables explicativas, particularmente aquellas que tengan relación con la habilidad del mecánico, puede ser esencial para determinar acciones como capacitación del taller. Información técnica del equipo, como composición de aceite, temperatura, vibraciones y frentes de trabajo puede mejorar considerablemente la predicción de los modelos predictivos, permitiendo incluso una asignación de equipos de acuerdo al nivel de exigencia del frente.

Una vez resuelta la dependencia en reparaciones correctivas anteriores, las variables significativas debiesen ser la utilización en el caso de los equipos *dumper* y horas de mantenimiento preventivo en el caso de equipos *jumbo* y *scoop*. En la medida que se incluyan nuevas variables, existe la posibilidad que surjan nuevos patrones de interés, permitiendo generar nuevas acciones por parte de la unidad de máquinas.

De acuerdo a la implementación de modelos predictivos, es posible seleccionar aquellas metodologías de mayor precisión para conformar un sistema de alerta temprana de equipos. Para el caso de los equipos *dumper* la predicción mediante distribuciones de probabilidad resulta ser la mejor alternativa de predicción, superando el modelo de árbol de decisión. Para el caso de los equipos *scoop* el modelo seleccionado depende de los criterios que fije la empresa constructora. En caso de priorizar la precisión del modelo, la regresión logística aparece como la mejor alternativa predictiva. El modelo de árbol de decisión, si bien cuenta con menor precisión, presenta un mayor equilibrio entre precisión y *recall*, permitiéndole mejores valores en el indicador de *f-measure*. Para el caso de los equipos *jumbo*, el modelo de árbol de decisión corresponde al modelo con mejores indicadores, tanto a nivel de precisión como a nivel de *f-measure*, convirtiéndolo en la mejor alternativa disponible. Cabe destacar que los modelos permiten obtener un ahorro potencial del 4% sobre los costos de reparación, por lo que mejorar sus medidas de desempeño puede ser interesante pensando en una reducción de costos en el corto o mediano plazo.

Dada la composición de los modelos predictivos, para el caso de los equipos *dumper* se determina un intervalo eficiente de mantenimiento. Para el caso de equipos *scoop* y *jumbo* en cambio, al no contar con variables de mantenimiento dentro de los modelos predictivos, se obtienen límites máximos de trabajo. Eventualmente, estos resultados presentarán mejoras en la medida que el análisis se realice por equipo o componentes. Para el caso de los equipos *dumper*, el intervalo eficiente corresponde a 25 horas efectivas de trabajo, casi un 50% menos que el intervalo promedio actual. Para el caso de los equipos *scoop*, el límite de trabajo es de 473 paladas, un 3% por debajo del intervalo observado actualmente en la empresa constructora. Para el caso de los equipos *jumbo*, se determina un límite de operación de 2970 metros perforados, cerca de 300 metros por sobre los intervalos actuales.

Generar un protocolo de cumplimiento de mantenciones en base a las producciones promedio no solo permite incluir nuevas fuentes de información para el modelo. En base a estos indicadores es posible determinar las responsabilidades del área de operaciones y de maquinaria, permitiendo medir el desempeño de cada una de ellas en la labor de reparación de equipos. De esta forma, se busca solucionar en parte el gran conflicto entre producción y mantenimiento, permitiendo a través de indicadores claros el compromiso de las unidades el uso de los equipos.

## Bibliografía

- [1] Springer, *Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety*, Primera edición ed. Londres, Inglaterra, 2008.
- [2] Banco Central. (2013) Banco Central - Actividad Económica y Gasto. [Online]. [http://www.bcentral.cl/estadisticas-economicas/series-indicadores/index\\_aeg.htm](http://www.bcentral.cl/estadisticas-economicas/series-indicadores/index_aeg.htm)
- [3] El Economista America. (2013, Julio) Sitio web El Economista America. [Online]. <http://www.economistaamerica.cl/reportajes-en-eAm-chl/noticias/4986630/07/13/El-millonario-aporte-de-Codelco-en-42-anos-de-historia.html>
- [4] Cámara Chilena de la Construcción. (2013) Sitio web CChC. [Online]. <http://www.cchc.cl/>
- [5] Cochilco. (2012, Julio) Informe Tendencias del Mercado del Cobre. Informe PDF.
- [6] Cochilco. (2012, Agosto) Las Inversiones en la Mediana Minería. Presentación PDF.
- [7] SOFOFA. (2013, Abril) Sitio web de Sofofa. [Online]. <http://web.sofofa.cl/Noticias/keller-con-suerte-se-concretaran-us-35-mil-millones-de-inversion-minera-para-2022/>
- [8] Comisión Chilena del Cobre, "Oportunidades de Negocio para Proveedores de Bienes, Insumos y Servicios Mineros en Chile," Comisión Chilena del Cobre, Santiago, Informe Oportunidades de Negocio 2008.
- [9] Diego Hernandez. (2011, Enero) Conferencia Programa Proveedores de Clase Mundial. Presentación PDF.
- [10] Redimin. (2012, Diciembre) Sitio web de Redimin - Revista Digital Minera. [Online]. <http://redimin.cl/2012/12/24/en-chile-invertiran-us100-mil-millones-en-la-mineria-en-8-anos/>
- [11] Mario Riveros, "A pesar de la crisis, ventas de proveedores suben 12%," *El Mercurio*, vol. B, no. 64107, p. 12, Julio 2013.
- [12] Departamento de Energía de Estados Unidos. (2002, Diciembre) Buenas Prácticas en Operaciones y Mantenimiento. Documento PDF.
- [13] Julian Ortiz. (2008, Marzo) Apunte de Explotación de Minas. Documento PDF.
- [14] Raúl Castro. (2010, Junio) Manejo de minerales y ventilación. Presentación Power Point.
- [15] Bill Keeter. (2006, Enero) Maintenance Technology. [Online]. <http://www.mt-online.com/january2006/reliability-activities-and-their-impact-on-weibull-shapes>

- [16] Robert Hall, "Analysis of Mobile Equipment Maintenance Data in an Underground Mine," Queen's University, Kingston, Tesis Master of Science 1997.
- [17] Khairy Kobbacy, Bahir Fawz, David Percy, and Harold Ascher, "A Full History Proportional Hazards Model for Preventive Maintenance Scheduling," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 13, pp. 187-198, Marzo 1997.
- [18] Qué Pasa Minería. (2012, Diciembre) Sitio web Revista Que Pasa Minería. [Online]. <http://quepasamineria.cl/index.php/noticias/item/1515-costos-operacionales-de-mineras-en-chile-suben-274-el-2012>
- [19] (2011, Septiembre) Area Minera. [Online]. <http://www.aminera.com/historico/54-contenido/35738-analisis-economico-el-negocio-del-mantenimiento-en-la-mineria-de-chile.html>
- [20] Hernán de Solminihaq. (2012, Abril) Chile país minero: Una oportunidad laboral. Presentación PDF.
- [21] Margaret Rouse. (2011, Enero) Sitio web de WhatIs. [Online]. <http://whatistechtarget.com/definition/machine-learning>
- [22] Linköping University. (2011, Noviembre) Introduction to Data Mining - Lecture 5. Presentación PDF.
- [23] Dennis J. Wilkins. (2002, Noviembre) Weibull.com Engineering Resource Website. [Online]. <http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>
- [24] Minería Chilena. (2009, Septiembre) Sitio web Minería Chilena. [Online]. [http://www.mch.cl/revistas/index\\_neo.php?id=979](http://www.mch.cl/revistas/index_neo.php?id=979)
- [25] Reliability Web. (2010, Septiembre) Sitio de Reliability Web. [Online]. [http://reliabilityweb.com/index.php/maintenance\\_tips/how\\_to\\_prevent\\_rcm\\_from\\_turning\\_into\\_really\\_costly\\_maintenance/](http://reliabilityweb.com/index.php/maintenance_tips/how_to_prevent_rcm_from_turning_into_really_costly_maintenance/)

## Anexo A: Glosario de Variables

Código	Variable
turno	Turno 'A' corresponde a jornada diurna, 'B' a la nocturna.
falla	Variable binaria, 1 si presenta fallas durante la jornada.
codigo_equipo	Código identificador del equipo.
HE_Ac	Horas efectivas de trabajo acumuladas desde el último evento <sup>19</sup> .
HE_TA	Horas efectivas del turno anterior.
HE_DA	Horas efectivas del día anterior.
HE_SA	Horas efectivas de la semana anterior.
HR_Ac	Horas de reserva acumuladas desde el último evento.
HR_TA	Horas de resera del turno anterior.
HR_DA	Horas de reserva del día anterior.
HR_SA	Horas de reserva de la semana anterior.
Mts_Ac	Metros perforados acumulados desde el último evento.
Mts_TA	Metros perforados durante el turno anterior.
Mts_DA	Metros perforados durante el día anterior.
Mts_SA	Metros perforados durante la semana anterior.
Prev_Ac	Intervenciones preventivas acumuladas desde el último evento. Horas registradas por Mecánico.
Prev_TA	Intervenciones preventivas durante el turno anterior. Horas registradas por Mecánico.
Prev_DA	Intervenciones preventivas durante el día anterior. Horas registradas por Mecánico.
Prev_SA	Intervenciones preventivas durante la semana anterior. Horas registradas por Mecánico.
Corr_TA	Intervenciones correctivas durante el turno anterior. Horas registradas por Mecánico.
Corr_DA	Intervenciones correctivas durante el día anterior. Horas registradas por Mecánico.
Corr_SA	Intervenciones correctivas durante la semana anterior. Horas registradas por Mecánico.
Hrs_Prev_Ac	Intervenciones preventivas acumuladas desde el último evento. Horas registradas por Operador.
Hrs_Prev_TA	Intervenciones preventivas durante el turno anterior. Horas registradas por Operador.
Hrs_Prev_DA	Intervenciones preventivas durante el día anterior. Horas registradas por Operador.
Hrs_Prev_SA	Intervenciones preventivas durante la semana anterior. Horas registradas por Operador.
Hrs_Corr_TA	Intervenciones correctivas durante el turno anterior. Horas registradas por Operador.
Hrs_Corr_DA	Intervenciones correctivas durante el día anterior. Horas registradas por Operador.

<sup>19</sup> Evento: Una falla o mantención preventiva realizada al equipo.

Hrs_Corr_SA	Intervenciones correctivas durante la semana anterior. Horas registradas por Operador.
participacion_operario	Porcentaje de turnos asignados al operador.
tipo_equipo	Clasificación de antigüedad de acuerdo al primer registro de horómetro.
tipo_operario	Clasificación del operario de acuerdo a su desempeño en las evaluaciones.
tipo_mecanico_anterior	Clasificación de mecánico de acuerdo a la duración de sus reparaciones.
Obra	Sublocalización asignada del equipo.
Marca	Marca del equipo.
M_MA	Variable binaria, 'M' corresponde a equipos propios, 'MA' a equipos arrendados.
disponibilidad_TA	Disponibilidad física del equipo durante el turno anterior.
disponibilidad_DA	Disponibilidad física del equipo durante el día anterior.
disponibilidad_SA	Disponibilidad física del equipo durante la semana anterior.
utilizacion_TA	Utilización del equipo durante el turno anterior.
utilizacion_DA	Utilización del equipo durante el día anterior.
utilizacion_SA	Utilización del equipo durante la semana anterior.
Corr mes anterior	Número de fallas del equipo durante el mes anterior.
MPFinal_TA	Suma de Prev_TA y Hrs_Prev_TA.
MPFinal_DA	Suma de Prev_DA y Hrs_Prev_DA.
MPFinal_SA	Suma de Prev_SA y Hrs_Prev_SA.

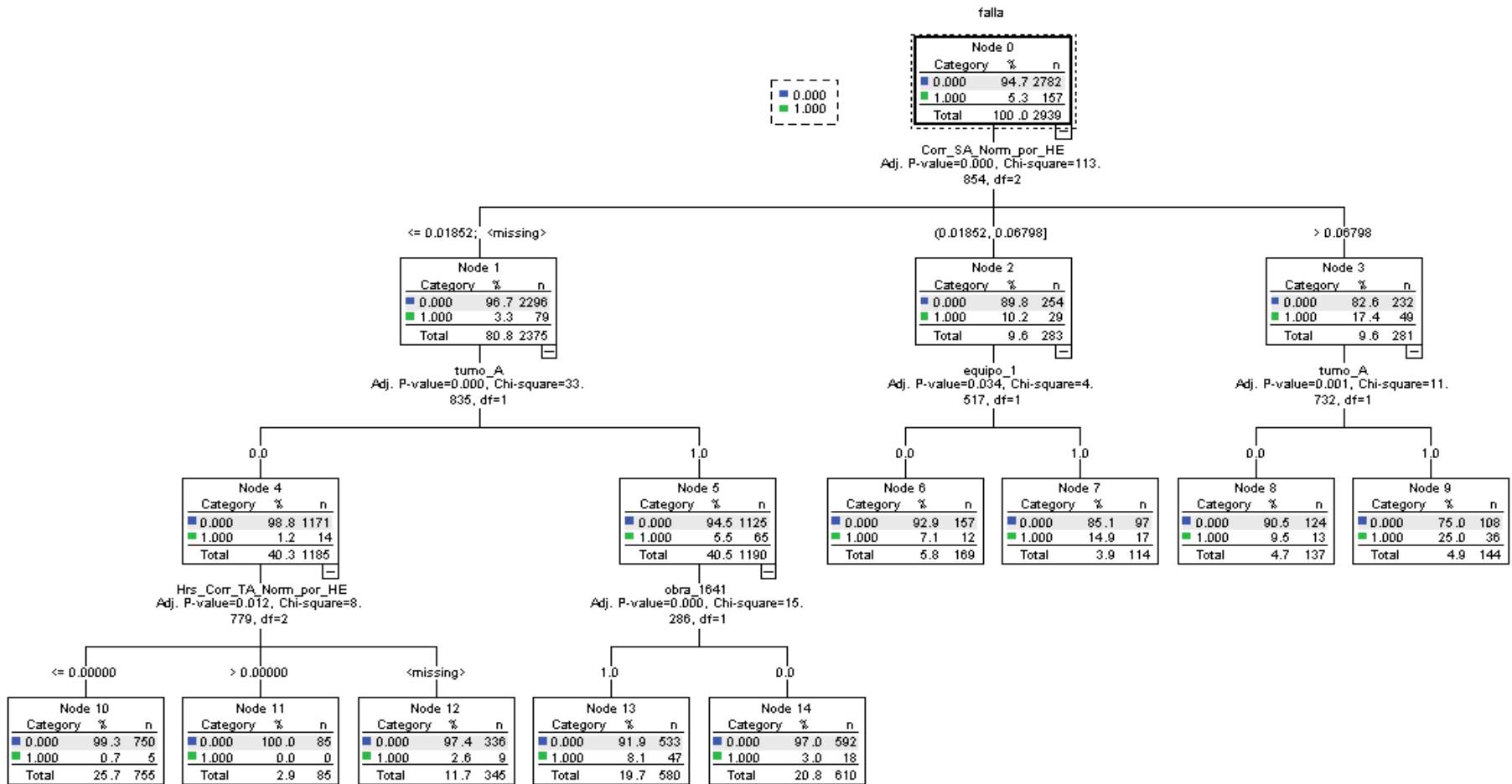
Estas variables pueden ser normalizadas por hora efectiva de trabajo, o bien normalizadas entre 0 y 1, dependiendo del modelo predictivo implementado. Los nombres de las variables se modifican siguiendo 2 reglas.

- Si la variable se normaliza por hora efectiva, se agrega '\_Norm\_por\_HE'.
- Si la variable se normaliza para que tome valores entre 0 y 1, se agrega '\_Max1'.

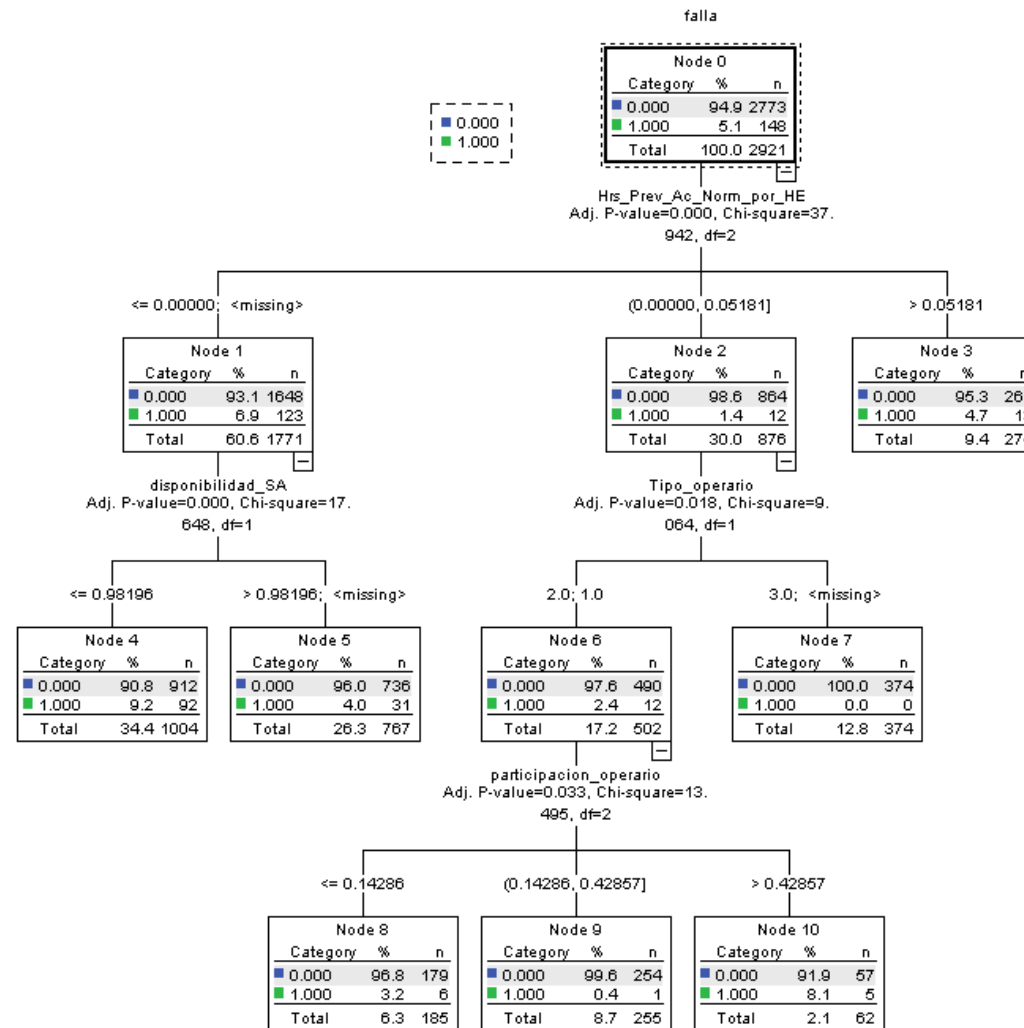
A modo de ejemplo. La variable 'Mts\_TA', correspondiente a los metros perforados durante el turno anterior, cambia a 'Mts\_TA\_Norm\_por\_HE' cuando se normaliza por las horas efectivas del turno anterior. Cabe destacar que esta normalización en particular corresponde a la velocidad de perforación promedio durante el turno anterior. Para el caso de la normalización entre 0 y 1, la variable 'Mts\_TA\_Norm\_por\_HE' cambia a 'Mts\_TA\_Norm\_por\_HE\_Max1'.

## Anexo B: Modelos Predictivos - Equipos Scoop

### B.1 Árbol de Decisión - Equipos Scoop



## B.2 Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Scoop



<= 0.14286

Node 8		
Category	%	n
■	96.8	179
■	3.2	6
<b>Total</b>	<b>6.3</b>	<b>185</b>

(0.14286, 0.42857]

Node 9		
Category	%	n
■	99.6	254
■	0.4	1
<b>Total</b>	<b>8.7</b>	<b>255</b>

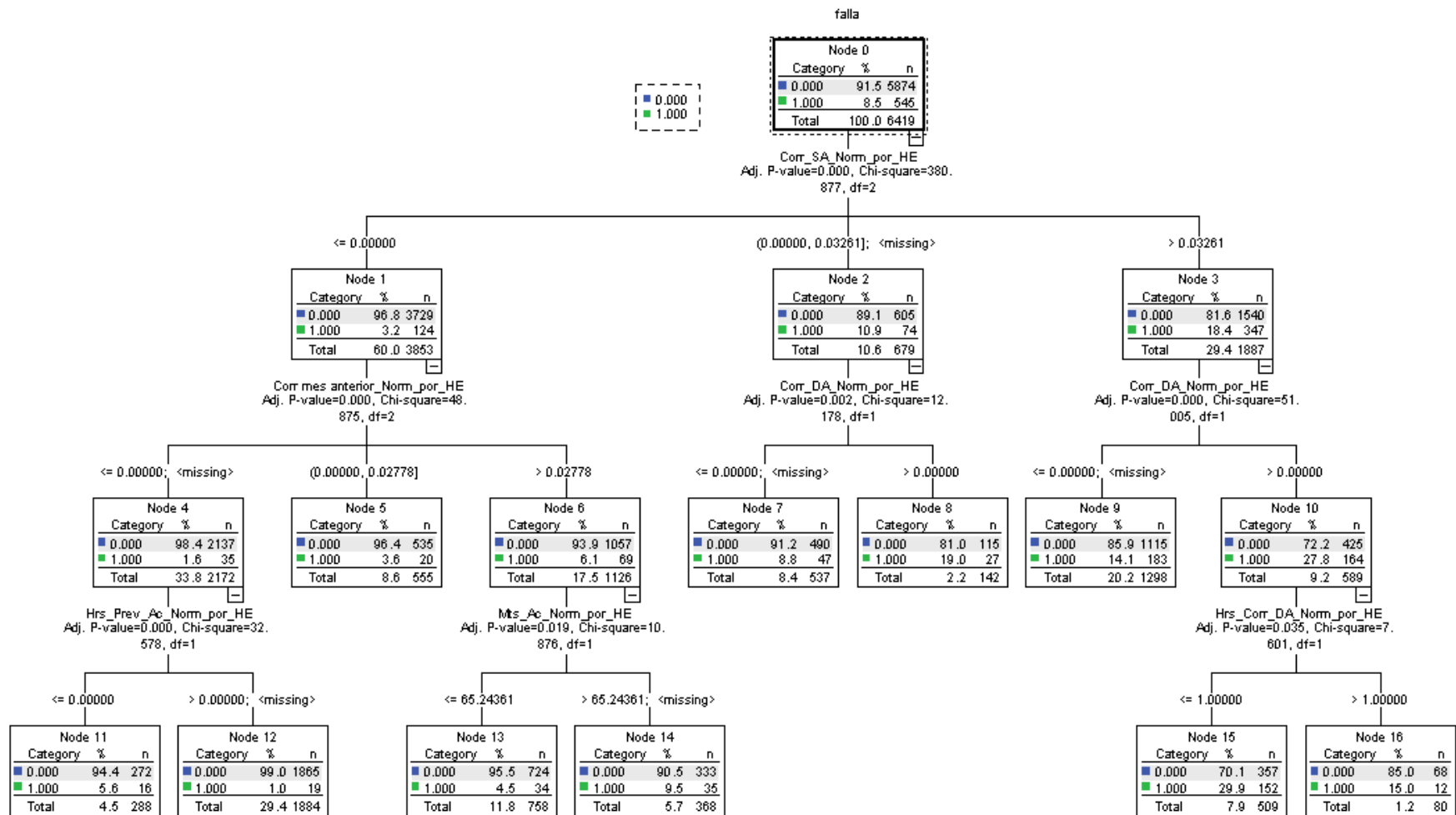
> 0.42857

Node 10		
Category	%	n
■	91.9	57
■	8.1	5
<b>Total</b>	<b>2.1</b>	<b>62</b>

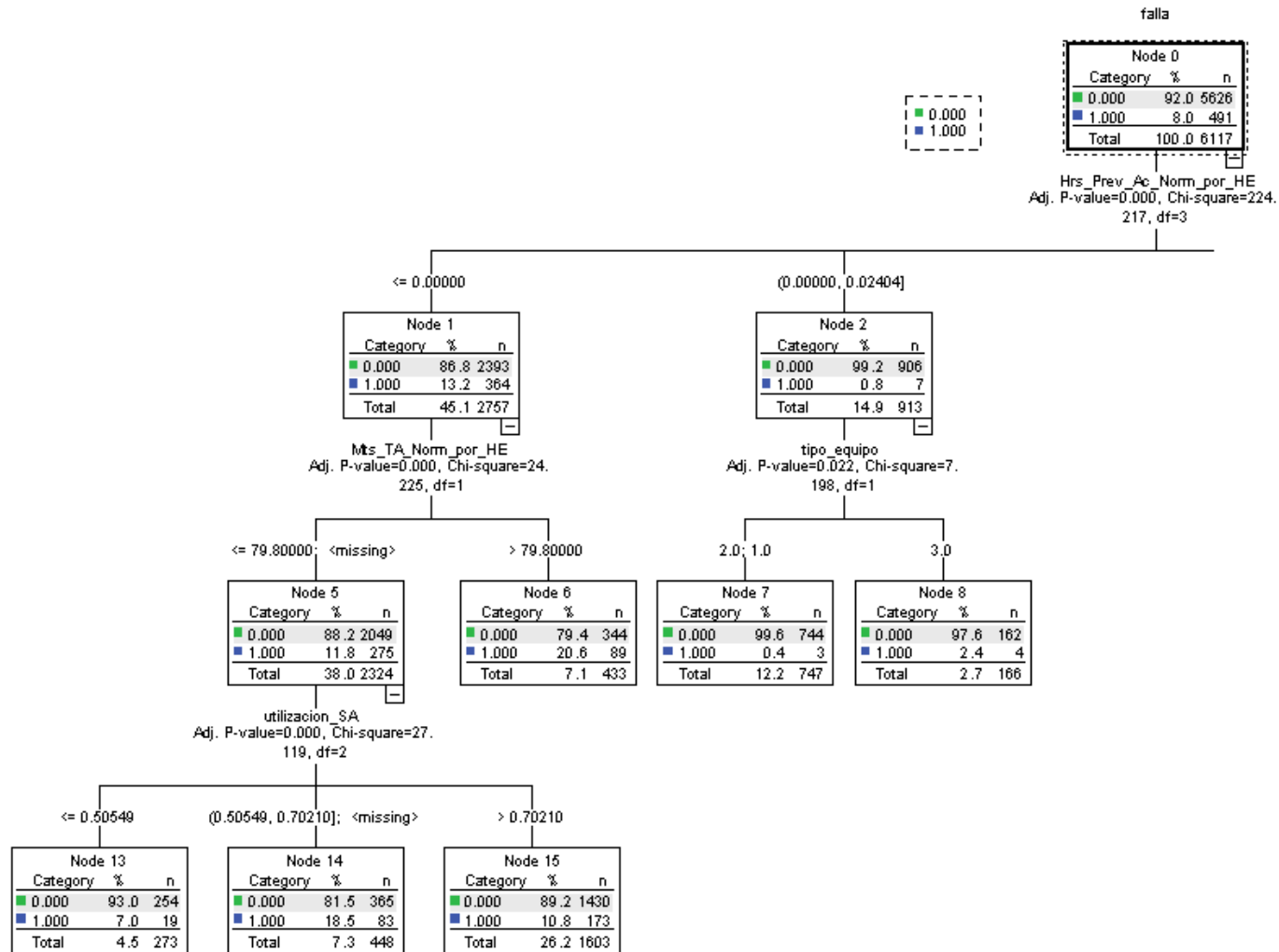


# Anexo C: Modelos Predictivos - Equipos Jumbo

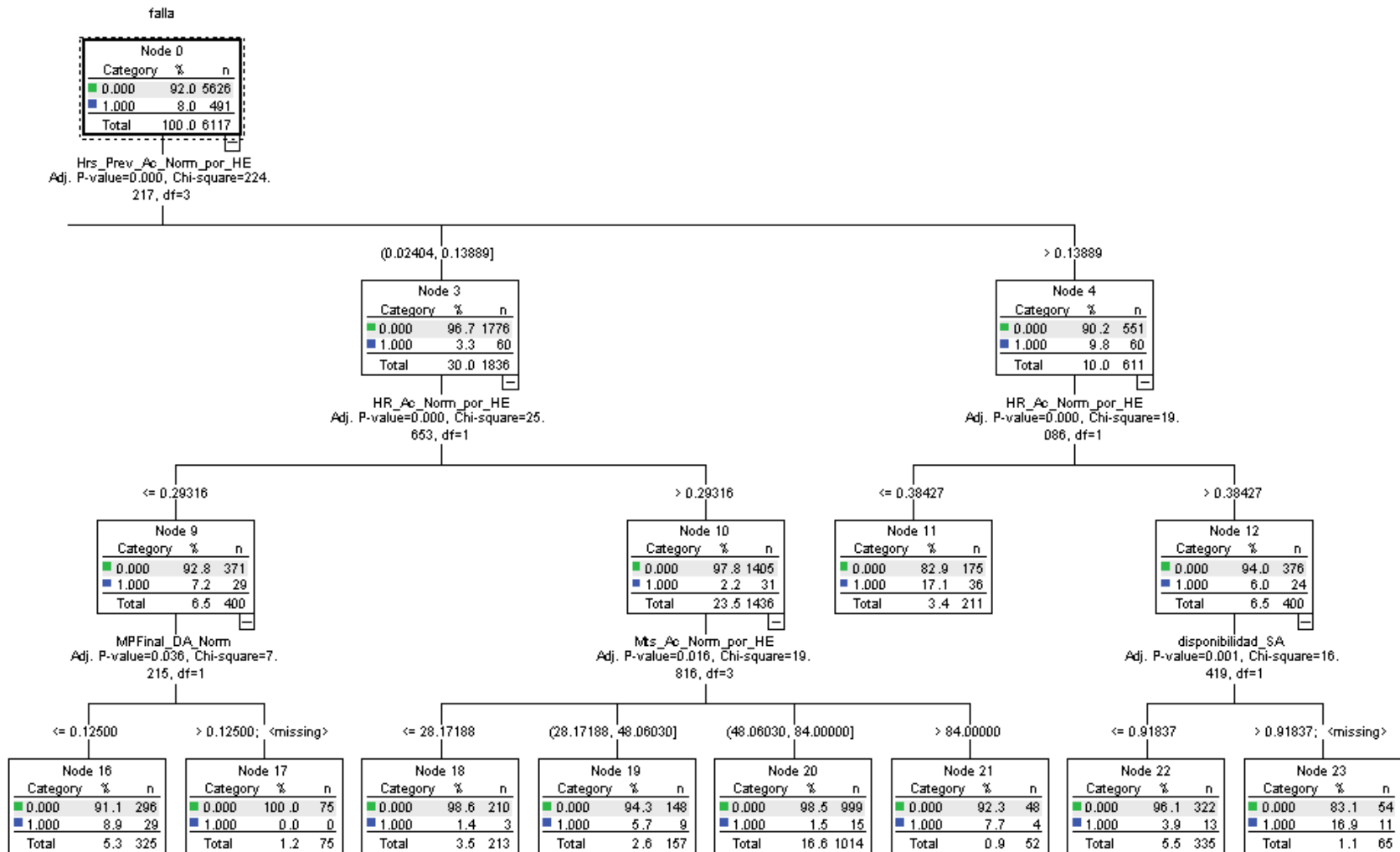
## C.1 Árbol de Decisión - Equipos Jumbo



## C.2 Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Jumbo - Primera mitad



## C.2 Árbol de Decisión sin Horas Correctivas - Equipos Jumbo - Segunda mitad



## Anexo D: Tabla Producción vs Horas de Reserva - Equipos Jumbo

La región sombreada corresponde a la zona de probabilidad menor a 0.22, obtenida a partir de la generación de escenarios operacionales. Definiendo criterios de operación, es posible determinar zonas de trabajo seguras, medias y riesgosas.

		HR_Ac_Norm_por_HE										
		0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
Metros_SA	0	0.174	0.170	0.167	0.164	0.161	0.157	0.154	0.151	0.148	0.145	0.142
	200	0.185	0.181	0.178	0.174	0.171	0.167	0.164	0.161	0.158	0.155	0.152
	400	0.196	0.192	0.189	0.185	0.181	0.178	0.174	0.171	0.168	0.164	0.161
	600	0.208	0.204	0.200	0.196	0.193	0.189	0.185	0.182	0.178	0.175	0.171
	800	0.220	0.216	0.212	0.208	0.204	0.201	0.197	0.193	0.189	0.186	0.182
	1000	0.233	0.229	0.225	0.221	0.217	0.213	0.209	0.205	0.201	0.197	0.193
	1200	0.247	0.242	0.238	0.234	0.229	0.225	0.221	0.217	0.213	0.209	0.205
	1400	0.261	0.256	0.251	0.247	0.243	0.238	0.234	0.230	0.226	0.222	0.218
	1600	0.275	0.270	0.266	0.261	0.256	0.252	0.248	0.243	0.239	0.235	0.230
	1800	0.290	0.285	0.280	0.276	0.271	0.266	0.262	0.257	0.253	0.248	0.244
	2000	0.305	0.300	0.295	0.290	0.286	0.281	0.276	0.271	0.267	0.262	0.258
	2200	0.321	0.316	0.311	0.306	0.301	0.296	0.291	0.286	0.281	0.277	0.272
	2400	0.337	0.332	0.327	0.322	0.317	0.312	0.306	0.301	0.297	0.292	0.287
	2600	0.354	0.349	0.343	0.338	0.333	0.328	0.322	0.317	0.312	0.307	0.302
	2800	0.371	0.366	0.360	0.355	0.349	0.344	0.339	0.333	0.328	0.323	0.318
	3000	0.389	0.383	0.377	0.372	0.366	0.361	0.355	0.350	0.345	0.339	0.334
	3200	0.406	0.401	0.395	0.389	0.384	0.378	0.372	0.367	0.361	0.356	0.351
	3400	0.424	0.418	0.413	0.407	0.401	0.396	0.390	0.384	0.379	0.373	0.368
	3600	0.442	0.436	0.431	0.425	0.419	0.413	0.408	0.402	0.396	0.391	0.385
	3800	0.461	0.455	0.449	0.443	0.437	0.431	0.426	0.420	0.414	0.408	0.403
4000	0.479	0.473	0.467	0.461	0.455	0.449	0.444	0.438	0.432	0.426	0.420	
4200	0.497	0.491	0.486	0.480	0.474	0.468	0.462	0.456	0.450	0.444	0.438	
4400	0.516	0.510	0.504	0.498	0.492	0.486	0.480	0.474	0.468	0.463	0.457	
4600	0.534	0.528	0.522	0.516	0.511	0.505	0.499	0.493	0.487	0.481	0.475	
4800	0.552	0.547	0.541	0.535	0.529	0.523	0.517	0.511	0.505	0.499	0.493	
5000	0.571	0.565	0.559	0.553	0.547	0.541	0.536	0.530	0.524	0.518	0.512	