



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

# **MODELO DE SELECCIÓN DE EQUIPOS PARA DESARROLLO RÁPIDO DE TÚNELES (RMD) EN UNA EMPRESA CONSTRUCTORA**

**Por**

**Pedro Ángel Véliz Bórquez**

Trabajo de título para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la  
Ingeniería y al Título de Ingeniero Civil

**Prof. Guía: Sergio Urrutia Zúñiga**

Mayo, 2013

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mis amigos y compañeros, a mis profesores, a mis colegas y jefes, a la empresa en la cual desarrollé este trabajo. Pero por sobre todo a mis padres, quienes hicieron todo lo que estaba a su alcance para guiarme a cumplir mi sueño de convertirme en un gran ingeniero.

## Agradecimientos

Agradezco a todos los que me apoyaron en este proyecto, desde mis amigos de universidad con quienes estudiábamos hasta altas horas de la noche para lograr aprobar exitosamente los ramos, como también a mis compañeros de trabajo y jefes quienes me apoyaron no solo con información y conocimiento sino que también me dieron motivación y las facilidades para poder llegar a este día.

Agradezco en forma especial al Sr. Angel Briones quien me orientó a realizar mi trabajo de título en esta área, me enseñó que la ingeniería abarca muchos más tópicos de los que yo conocía hasta ese momento.

Dentro de mi aspecto más personal sin duda debo agradecer a mis padres, quienes fueron parte presente de todo mi proceso educativo, siempre dándome fuerzas para no flaquear y lograr este objetivo, siempre tuvieron toda su confianza en mí.

Finalmente agradezco a mi profesor guía Sr. Sergio Urrutia quien me guió en este largo proceso, con su rigor y perfección me dio las herramientas necesarias para lograr un trabajo de inmejorable calidad.

# Índice

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos.....	3
Glosario .....	6
Lista de abreviaturas y siglas.....	7
Lista de símbolos.....	8
Lista de figuras .....	9
Lista de ecuaciones.....	12
Resumen .....	13
Capítulo 1. Antecedentes Generales.....	14
1.1    Introducción.....	14
1.2    Motivación del estudio.....	14
1.3    Objetivos de la investigación.....	15
1.4    Hipótesis de Trabajo .....	15
1.5    Metodología de la Investigación.....	16
1.6    Alcances de la Investigación.....	17
1.7    Resultados esperados .....	17
Capítulo 2. Marco teórico.....	18
2.1    Construcción de Túneles.....	18
2.1.1    Metodología de construcción.....	19
2.1.2    Ciclos.....	19
2.1.3    Maquinaria.....	21
2.2    El método Rapid Mine Development (RMD).....	23
2.2.1    Proyecto Cadia East.....	23
2.2.2    Descripción del método .....	24
2.3    Simulación de operaciones .....	25
2.3.1    Características de sistemas y modelos.....	26
2.3.2    Razones y objetivos para simular .....	27
2.3.3    Problemas de la simulación .....	28
2.3.4    Simulación continua y simulación discreta .....	29
2.3.5    Desarrollo modelo simulación.....	30
2.3.6    Software de simulación .....	33
2.3.7    Simulación Adoptada .....	34

2.3.8	Conceptos estadísticos para la simulación.....	35
Capítulo 3. Desarrollo.....		36
3.1	Análisis de resultados del Método RMD.....	36
3.1.1	Sub Etapa de Perforación .....	36
3.1.2	Sub Etapa de Carguío y tronadura.....	37
3.1.3	Sub etapa de Extracción y transporte de marina.....	38
3.1.4	Sub etapa de Fortificación .....	39
3.1.5	Resultados del método.....	39
3.2	Descripción del proyecto .....	43
3.3	Análisis comparativo de metodología tradicional versus RMD .....	47
3.4	Modelo de construcción del túnel.....	57
3.4.1	Descripción del modelo a simular .....	57
3.4.2	Descripción del modelo conceptual.....	57
3.4.3	Recolección de datos .....	69
3.4.4	Desarrollo modelo computacional.....	76
3.4.5	Verificación del modelo .....	82
3.4.6	Validación del modelo.....	82
3.4.7	Diseño experimento.....	83
3.4.8	Análisis de resultados .....	85
Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones .....		95
Referencias Bibliográficas.....		97
ANEXO 1: Distribución de actividades .....		98
ANEXO 2: Ficha técnica de equipos.....		119
ANEXO 3: Tipos de sistema de modelación.....		121
ANEXO 4: Conceptos estadísticos de simulación .....		123
ANEXO 5: Herramienta Input Analyzer .....		129
ANEXO 6: Manual de usuario del modelo de selección de equipos.....		131
ANEXO 7: Factor K según tipo de roca.....		136
APENDICE 1: Distribución normal tipificada.....		138
APENDICE 2: Distribución T-Student .....		140

## Glosario

**Equipo mayor:** Maquinaria pesada de gran envergadura.

**Jumbo:** Equipo de perforación, el cual puede tener desde 1 a 3 brazos, se utiliza en la construcción de túneles principalmente.

**Scoop:** Equipo de carguío, similar a una pala mecanizada, se utiliza principalmente en túneles dado su espacio reducido.

**Dumper:** Equipo de transporte de material de bajo perfil, diseñado para trabajar en túneles.

**Tronadura:** Explosión controlada para fragmentar roca.

**Marina:** Nombre con el que se conoce al material suelto después de una tronadura.

**Frente:** Sección transversal de trabajo de un túnel.

**Portal:** Acceso desde la superficie al interior de un túnel.

**Shotcrete:** Hormigón proyectado, se utiliza para fortificar el túnel.

**Lechada:** Mezcla de cemento y agua utilizada para fijar pernos.

**Estocada:** Ensanchamiento de un lado del túnel para maniobras de transporte.

**Planchones:** Rocas de gran tamaño que se desprenden de la parte superior del túnel.

**Panel Caving:** Método de explotación en base a hundimientos por paneles.

**Costo Posesión:** Costo fijo mensual por concepto de mantener en obra un equipo aun cuando este no se utilice.

**Costo operación:** Costo variable mensual por concepto de uso del equipo, es decir, es un costo unitario de utilización.

## Lista de abreviaturas y siglas

**RMD:** Rapide mine development (desarrollo rápido de túneles)

**NNM:** Nuevo Nivel Mina

**ELP:** Esmeralda Largo Plazo

**DET:** División El Teniente

**RCS:** Rig control system (plataforma de sistema de control)

**ABC:** Advanced boom control (control avanzado de brazo)

**TBM:** Tunnel boring machine (tuneladora)

**LHD:** Load Haul Dump (cargar, acarrear, arrojar)

**OP:** Or Pass (punto de vaciado)

**NOX:** Óxido de nitrógeno

**CO:** monóxido de carbono

**HP:** Horse power (caballos de poder)

**KS:** Kolmogorov Smirnov

**TAP:** Túnel de acceso principal

**ANFO:** Ammonium nitrate fuel oil (combustible de nitrato de amonio)

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de carbono

**NO:** Monóxido de nitrógeno

**m.s.n.m:** Metros sobre el nivel del mar

**tpd:** Toneladas por día

## Lista de símbolos

$S$ : Desviación estándar

$\theta$ : Parámetro

$\mu$ : Media

$H_0$ : Hipótesis nula

$H_1$ : Hipótesis alternativa

$n$ : Número de muestras

$S^2$ : Varianza

$N$ : Número de réplicas

$Z$ : Distribución normal estándar

$H$ : Ancho medio de intervalo de confianza

$\alpha$ : Nivel de significancia

## Lista de figuras

Figura 2.1 - Esquema de partes principales de un túnel, fuente: How Stuf Works 2006.....	18
Figura 2.2 - Jumbo Rocket Boomer 282, fuente: Atlas Copco.....	22
Figura 2.3 - Scoop ST-1030, fuente: Atlas Copco. ....	22
Figura 2.4 - Dumper EJC-430, fuente: Caterpillar. ....	23
Figura 2.5 - Ubicación geográfica proyecto Cadia East, fuente: Cadia East Project. ....	23
Figura 2.6 - Distrito minero de Cadia East Valley, fuente: Cadia East Project.....	24
Figura 2.7 - Formas de estudiar un sistema, fuente: Law y Kelton (2000). ....	26
Figura 3.1 - Gráfico comparativo ciclo perforación, fuente: Cadia East Project. ....	37
Figura 3.2 - Gráfico comparativo ciclo carguío, fuente: Cadia East Project. ....	38
Figura 3.3 - Gráfico comparativo ciclo tronadura, fuente: Cadia East Project. ....	39
Figura 3.4 - Gráfico avance mensual, fuente: Cadia East Project. ....	40
Figura 3.5 - Gráfico avance diario, fuente: Cadia East Project. ....	40
Figura 3.6 - Desglose de tiempos del ciclo completo, fuente: Cadia East Project. ....	41
Figura 3.7 - Gráfico comparativo de método RMD v/s método convencional, fuente: Cadia East Project.....	41
Figura 3.8 - Gráfico avance promedio mensual, fuente: Cadia East Project. ....	42
Figura 3.9 - Costos mensuales de desarrollo, fuente: Cadia East Project. ....	42
Figura 3.10 - Fotografías túnel de acceso personal, fuente: Codelco. ....	43
Figura 3.11 - Esquema del proyecto, fuente: Codelco. ....	44
Figura 3.12 - Mapa litológico del proyecto, fuente: Codelco.....	44
Figura 3.13 - Acercamiento mapa litológico con su leyenda, fuente: Codelco.....	45
Figura 3.14 - Sección del túnel TAP, fuente: Codelco.....	45
Figura 3.15 - Perfil del túnel TAP, fuente: Codelco.....	46
Figura 3.16 - Esquema de sub-etapas del ciclo de construcción, fuente: elaboración propia. .	47
Figura 3.17 - Esquema de sub-etapa detallado, fuente: elaboración propia. ....	47
Figura 3.18 - Jumbo de 2 brazos, fuente: Atlas Copco.....	48
Figura 3.19 - Pantalla de jumbo con diagrama de disparo, fuente: Atlas Copco. ....	49
Figura 3.20 - Jumbo de 3 brazos, fuente: Atlas Copco.....	49
Figura 3.21 - Gráfico CO Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project.....	51
Figura 3.22 - Gráfico NO Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project.....	51
Figura 3.23 - Gráfico NO <sub>2</sub> Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project. ....	52
Figura 3.24 - Fotografía Scoop R-1600G, fuente: Caterpillar.....	53
Figura 3.25 - Fotografía Tolva 3644, fuente: Kauffman. ....	53
Figura 3.26 - Fotografía Scoop Toro 0011, fuente: Sandvik.....	53
Figura 3.27 - Fotografía Dumper MT 5010, fuente: Atlas Copco.....	54
Figura 3.28 - Fotografía Hidroscaling, fuente: Atlas Copco. ....	55
Figura 3.29 - Fotografía Scaling mecanizado, fuente: Atlas Copco.....	55
Figura 3.30 - Esquema de colocación de pernos, fuente: Codelco.....	56
Figura 3.31 - Modelo conceptual del túnel, fuente: elaboración propia. ....	57
Figura 3.32 - Histograma de datos actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer. ....	72
Figura 3.33 - Reporte de error al cuadrado actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer.....	72

Figura 3.34 - Reporte de distribución triangular actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer.....	72
Figura 3.35 - Histograma de datos actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: Software Input Analyzer.....	74
Figura 3.36 - Reporte de error al cuadrado actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: Software Input Analyzer.....	74
Figura 3.37 - Reporte de distribución triangular actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: Software Input Analyzer.....	75
Figura 3.38 - Esquema modelo computacional del túnel, fuente: Software ARENA. ....	77
Figura 3.39 - Módulo Create, fuente: Software ARENA. ....	78
Figura 3.40 - Módulo Hold, fuente: Software ARENA. ....	78
Figura 3.41 - Módulo Assign, fuente: Software ARENA. ....	79
Figura 3.42 - Módulo Process (1), fuente: Software ARENA.....	79
Figura 3.43 - Módulo Process (2), fuente: Software ARENA.....	80
Figura 3.44 - Módulo Record, fuente: Software Arena. ....	80
Figura 3.45 - Módulo Dispose, fuente: Software Arena.....	81
Figura 3.46 - Gráfico de distribución de tiempos de actividades, fuente: elaboración propia. .	85
Figura 3.47 - Gráfico actividades equipos críticos, fuente: elaboración propia. ....	86
Figura 3.48 - Gráfico comparativo avance mensual, fuente: elaboración propia. ....	88
Figura 3.49 - Gráfico comparativo costo unitario equipos por avance, fuente: elaboración propia. ....	88
Figura 3.50 - Gráfico avance mensual método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	89
Figura 3.51 - Gráfico costo unitario equipos por avance método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	89
Figura 3.52 - Gráfico duración actividad marcación frente método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	90
Figura 3.53 - Gráfico duración actividad perforación frente método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	90
Figura 3.54 - Gráfico duración actividad ventilación y chequeo de gases método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 3.55 - Gráfico duración actividad retiro de marina método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 3.56 - Gráfico duración actividad marcación orificios método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	92
Figura 3.57 - Gráfico duración actividad perforación orificios método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	92
Figura 3.58 - Gráfico proyección costos equipos por avance método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 3.59 - Gráfico proyección duración total construcción método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 4.1 - Gráfico comparativo avance mensual de escenarios RMD v/s metodología tradicional, fuente: elaboración propia. ....	96
Figura 4.2 - Gráfico comparativo costo unitario equipos críticos por unidad de avance método RMD v/s metodología tradicional, fuente: elaboración propia. ....	96

## Lista de tablas

Tabla 2.1 - Comparación entre simulación continua y discreta, fuente: Law & Kelton (2000). .....	29
Tabla 3.1 - Variables utilizadas en el modelo, fuente: elaboración propia. ....	59
Tabla 3.2 - Datos de toma de terreno actividad Quemada, fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 3.3 - Datos de toma de terreno actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: elaboración propia. ....	73
Tabla 3.4 - Resumen distribución triangular de actividades, fuente: elaboración propia. ....	76
Tabla 3.5 - Resumen distribución triangular de actividades, fuente: elaboración propia. ....	83
Tabla 3.6 - Características jumbo método tradicional, fuente: elaboración propia. ....	83
Tabla 3.7 - Características scoop metodología tradicional, fuente: elaboración propia. ....	83
Tabla 3.8 - Características dumper metodología tradicional, fuente: elaboración propia. ....	84
Tabla 3.9 - Características jumbo metodología RMD, fuente: elaboración propia. ....	84
Tabla 3.10 - Características scoop metodología RMD, fuente: elaboración propia. ....	84
Tabla 3.11 - Características dumper metodología RMD, fuente: elaboración propia. ....	84
Tabla 3.12 - Resumen escenarios método RMD, fuente: elaboración propia. ....	85
Tabla 3.13 - Resumen variables de entrada escenarios método RMD, fuente: elaboración propia. ....	87
Tabla 3.14 - Resumen estadísticos de salida escenarios método RMD, fuente: elaboración propia. ....	87

## Lista de ecuaciones

Ecuación 3.1 – Cálculo de área .....	60
Ecuación 3.2 – Cálculo de perímetro.....	60
Ecuación 3.3 – Colocación de malla .....	61
Ecuación 3.4 – Retiro de marina .....	62
Ecuación 3.5 – Colocación de shotcrete.....	63
Ecuación 3.6 – Marcación de frente .....	63
Ecuación 3.7 – Marcación de orificios .....	63
Ecuación 3.8 – Colocación de pernos.....	64
Ecuación 3.9 – Perforación de frente.....	65
Ecuación 3.10 – Perforación de orificios.....	66
Ecuación 3.11 – Avance mensual.....	66
Ecuación 3.12 – Costo utilización jumbo.....	67
Ecuación 3.13 – Costo utilización scoop.....	68
Ecuación 3.14 – Costo utilización dumper.....	69
Ecuación 3.15 – Costo total equipos .....	69
Ecuación 3.16 – Costo unitario.....	69
Ecuación 3.17 – Cálculo empírico de N.....	81
Ecuación 3.18 – Cálculo empírico de S.....	82

## Resumen

El presente trabajo de título se basa en el concepto de desarrollo rápido de túneles, una metodología constructiva que ha sido exitosamente probada en Australia en numerosos proyectos mineros. Éste método denominado RMD por sus siglas en inglés Rapid Mine Development nació con el objetivo de optimizar los tiempos involucrados en la construcción de túneles de gran sección y frente de trabajo única. Basa su filosofía básicamente en organizar los recursos destinados al desarrollo de un túnel, bajo el concepto de maximizar la utilización de la frente<sup>1</sup> y optimizar las operaciones unitarias y ciclo global de trabajo, empleando tecnologías de vanguardia que cautelen la seguridad, como lo son la perforación de tiros largos, la utilización de equipos de carguío y transporte de gran capacidad, uso de emulsión como explosivo, fortificación con shotcrete<sup>2</sup> con fibra, pernos con resina, entre otros.

En particular se aborda el tema de la selección de equipos de perforación, transporte y carguío, unas de las variables más relevantes dentro del concepto de desarrollo rápido de túneles. Para esto se realiza una simulación de operaciones de la construcción de un túnel real incorporando todas las variables necesarias a fin de recrear computacionalmente su construcción. A través de la simulación se puede establecer un modelo de selección de equipos con una sólida base teórica-experimental, en la cual se puede probar distintos equipos y/o combinaciones de estos, situación que en la vida real es imposible de poder realizar por el altísimo costo que involucraría realizar este estudio. Al concluir este estudio los resultados esperados son:

- Evaluación técnica-económica para minimizar la incertidumbre en la toma de decisión en la selección de equipos.
- Determinación de la eficiencia operacional en la flota de equipos para el Desarrollo Rápido de Túneles.
- Aumento de la productividad y disminución del costo unitario mediante la incorporación de equipos de mayor tecnología y prestaciones, frente a los equipos de la metodología tradicional.

---

<sup>1</sup>Frente: Sección transversal de trabajo del túnel

<sup>2</sup>Shotcrete: Hormigón proyectado

# Capítulo 1. Antecedentes Generales

## 1.1 Introducción

En el campo de la ingeniería civil, las obras civiles, como es el caso de los túneles, juegan un rol importantísimo en el desarrollo de un país, aun cuando estos sean uno de los retos más complejos para la ingeniería.

El ingeniero civil debe poseer las herramientas necesarias para dar soluciones constructivas innovadoras generando modelos aptos, los cuales a su vez, deben estar sustentados en una fuerte base teórica-experimental.

La elección óptima de equipo es una tarea compleja donde intervienen un sin número de variables, en un ambiente donde existen muchas marcas, modelos y tamaños disponibles. Los encargados de efectuar la selección de equipos no siempre tienen una herramienta apropiada que le permita evaluar y decidir cuál es la mejor opción. La simulación de operaciones contribuye a ayudar a esta selección. La simulación es una herramienta que introduce las variables involucradas a un modelo computacional para representar en forma fiel la realidad y pudiendo trabajar sobre ella sin intervenir en forma real el proyecto, lo que conlleva a una solución práctica a la hora de probar nuevas metodologías y tecnologías. Mediante esta simulación se pretende representar el proceso constructivo completo (excavación, acarreo, perforación y fortificación) para desarrollar el modelo constructivo del túnel en estudio.

## 1.2 Motivación del estudio

Una visión estratégica determina que el futuro de la minería subterránea y sus accesos a través de túneles carreteros en Chile apunta a la implementación del método de desarrollo rápido de túneles, por lo que la correcta selección de equipos es factor clave para el desempeño óptimo en la construcción rápida de este tipo de obra civil.

Por otra parte, en la construcción de túneles, Codelco pretende generar en sus contratos de obras, escenarios que permitan a las empresas contratistas innovar respecto de metodologías de trabajo, con incorporación de tecnologías y equipos que cubran estas nuevas necesidades de optimización y seguridad al corto plazo. Lo anteriormente descrito manifiesta una gran oportunidad de desarrollo.

Desde un análisis interno, el método propone aumentar significativamente la producción. También es cierto que dicho método no es aplicable en su totalidad por factores culturales, organizacionales y/o recursos humanos.

Ahora, desde un análisis externo, el método genera una nueva competencia en el mercado de los equipos y a la vez detractores conservadores con temor a la innovación.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

Objetivo general

-Evaluar un modelo de selección de equipos apropiados para la implementación del Método de Desarrollo Rápido de Túneles en una empresa constructora.

Objetivos específicos

- Identificar las variables relevantes presentes en la construcción de un túnel.
- Aplicar un modelo de simulación de operaciones que represente el proceso constructivo completo involucrado en la construcción de un túnel.
- Emplear una simulación del proceso constructivo mediante metodología tradicional.
- Emplear una simulación del proceso constructivo mediante el método RMD.
- Diferenciar resultados de la metodología tradicional v/s el método de RMD.
- Evaluar la flota de equipos adecuados dada las condiciones simuladas.
- Valorizar el Método de Desarrollo Rápido de Túneles para una buena decisión económica.

### **1.4 Hipótesis de Trabajo**

Se pretende demostrar que a través de una simulación de operaciones es posible evaluar un modelo de selección de equipos basado en el método RMD que aumenta la productividad del proceso constructivo y a la vez que disminuye el costo unitario como también la incertidumbre en la toma de decisión generada a la hora de invertir en nueva tecnología.

## 1.5 Metodología de la Investigación

A continuación se señala la metodología utilizada en este estudio:

1. **Formulación del problema:** Se define el por qué a realizar el proyecto, los criterios de elección del túnel, los supuestos iniciales y todas las consideraciones necesarias para lograr obtener los resultados deseados.
2. **Recolección de los datos y definición del modelo:** Se realiza un estudio de tiempos cuya duración es de cuatro meses, donde se mide cada actividad. Se define el ciclo de construcción y las variables a utilizar.
3. **Validación del modelo conceptual:** Se revisa la lógica del modelo conceptual y se corrigen errores antes de avanzar en el modelo.
4. **Construcción del modelo computacional y su verificación:** Se aplica el modelo conceptual en un software de simulación verificando que funcione de acuerdo al modelo conceptual.
5. **Ejecución de corridas piloto:** Se ejecuta corridas piloto que permitan chequear los valores que arroje sean acordes a los esperados.
6. **Validación del modelo computacional:** Se valida el modelo con las distribuciones obtenidas de la recolección de datos.
7. **Diseño de experimentos:** Se generan distintos escenarios los cuales incorporarán todas las mejoras y/o implementaciones del método RMD.
8. **Ejecución de corridas de producción:** Se ejecuta el modelo en una aplicación que involucre distintos escenarios.
9. **Análisis de los datos de salida:** Se analizan los datos obtenidos permitiendo la elección óptima de los equipos según el método RMD.
10. **Documentación presentación y uso de los resultados:** Se confecciona un manual de usuario del modelo, anexando todas las fichas técnicas de los equipos como material adicional.

## 1.6 Alcances de la Investigación

El presente trabajo de título se inicia con una extensa revisión bibliográfica referente al Método de Desarrollo Rápido de Túneles desde informes de visitas técnicas del proyecto Cadia East hasta documentos confeccionados por las distintas empresas del rubro. A continuación se destacan los siguientes alcances que delimitan el estudio:

-Se simula la construcción de un túnel de acceso principal, perteneciente al proyecto Nuevo Nivel Mina de División el Teniente, Codelco. Sin embargo, el modelo construido es totalmente flexible por lo que es posible aplicarlo a cualquier tipo de túnel.

-El modelo elaborado es apto para cualquier tipo de roca, ver ANEXO 7.

-Adicionalmente al alcance anterior, para la aplicación del método RMD es fundamental que los túneles sean de gran sección y longitud, ya que la base de este método es establecer un proceso continuo con una importante duración a través del tiempo en el cual sea conveniente su uso.

-El Método de Desarrollo Rápido de Túneles se basa en un método constructivo de perforación y voladura, excluyendo otros (TBM, excavadora o fresadora).

-Se hace el estudio en una empresa constructora líder en el rubro de construcción de túneles. En general el método es apto para todo tipo de túneles: hidroeléctricos, carreteros y en particular este estudio se realizará en un túnel minero, ya que es la línea en donde se desempeña la empresa, de la cual se obtendrá la información.

-Como último alcance, este trabajo de título está acotado al proceso constructivo de un túnel utilizando el Método de Desarrollo Rápido de Túneles. Sin embargo, deja abierto el método a futuros estudios tales como: técnicas de fortificación, innovaciones constructivas, estructura organizacional, entre otros temas.

## 1.7 Resultados esperados

A continuación se presentan los resultados esperados del trabajo de título:

- Evaluación técnica-económica para minimizar la incertidumbre en la toma de decisión en la selección de equipos.
- Determinación de la eficiencia operacional en la flota de equipos para el Desarrollo Rápido de Túneles.
- Aumento de la productividad y disminución del costo unitario mediante la incorporación de equipos de mayor tecnología y prestaciones, frente a los equipos de la metodología tradicional.

## Capítulo 2. Marco teórico

Este capítulo provee un entendimiento sobre los aspectos básicos de la construcción de túneles, una breve descripción del método Rapid Mine Development y una explicación conceptual de la simulación de operaciones.

### 2.1 Construcción de Túneles

El Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua define al túnel como: “Paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una comunicación a través del monte, por debajo de un río u otro obstáculo”.

López Jimeno<sup>3</sup> (1997) dice que dentro de los usos más frecuentes pueden enumerarse los túneles para vehículos, para redes de ferrocarril urbano o metros, para uso peatonal, para abastecimiento de agua, saneamiento, galerías de minas y túneles exploratorios.

Un túnel es un conducto horizontal situado bajo tierra. Mientras que la erosión y otras fuerzas de la naturaleza pueden formar túneles, están los túneles artificiales - los túneles creados por el proceso de excavación. Hay muchas maneras diferentes para excavar un túnel, incluido el trabajo manual, explosivos, un rápido calentamiento y enfriamiento, maquinaria para hacer túneles o una combinación de estos métodos.

El siguiente esquema (ver figura 2.1) muestra la relación entre estas estructuras bajo tierra en un túnel típico de montaña. La apertura del túnel es un portal. El "techo" del túnel, o la mitad superior del tubo, es la corona. La mitad inferior es el invertido. La geometría básica del túnel es un arco continuo. Debido a que los túneles deben soportar una gran presión por todos lados, el arco es una forma ideal.



Figura 2.1 - Esquema de partes principales de un túnel, fuente: How Stuf Works 2006.

<sup>3</sup> López Jimeno, C. (1997). Manual de Túneles y Obras Subterráneas. Madrid: Entorno Gráfico S.L.

### 2.1.1 Metodología de construcción

Existen diversas formas de construir un túnel. En suelo blando la más común es la excavación con retroexcavadora, siendo posible también el uso de TBM o fresadoras. En suelo duro o roca se pueden usar TBM<sup>4</sup>, fresadoras o el método de perforación y voladura. En este estudio solo se analizará el método de perforación y voladura porque es la base del método RMD.

Los tipos de fortificación que existen son muy diversos y la elección depende principalmente del tipo de roca donde se construirá el túnel. De este modo una roca de muy mala calidad puede necesitar marcos metálicos, marcos de hormigón o pernos con malla y hormigón proyectado. En cambio una roca muy buena puede no necesitar fortificación o sólo pernos eventuales.

### 2.1.2 Ciclos

La construcción de un túnel es un proceso cíclico donde siempre se van repitiendo las mismas etapas. Dependiendo del tipo de fortificación el ciclo sólo varía en cuanto a agregarle o quitarle actividades relacionadas con la fortificación.

A continuación se da una breve descripción de las actividades del ciclo de construcción:

1. Actividad n°1 Marcación de la frente: Se refiere a la acción de marcar con pintura el lugar donde deberían ir las perforaciones que ejecutará posteriormente el jumbo<sup>5</sup> electrohidráulico. Estas perforaciones tienen por objetivo final ser el lugar donde se colocarán los explosivos para la posterior voladura.
2. Actividad n°2 Instalación equipo de perforación: Consiste en instalar el jumbo en su posición de trabajo junto a todos los consumibles necesarios.
3. Actividad n°3 Perforación de la frente: Se refiere a la acción de realizar perforaciones con el Jumbo<sup>5</sup> electrohidráulico en la frente del túnel para que después pueda ser cargada con explosivos.
4. Actividad n°4 Retiro equipo de perforación: Consiste en retirar el jumbo de su posición de trabajo para darle paso a la entrada de otros equipos a la frente de trabajo.
5. Actividad n°5 Instalación equipo de carguío: Corresponde a la colocación del equipo de detonación en la frente a volar.
6. Actividad n°6 Carguío frente: Es la acción de colocar el explosivo en las perforaciones, la conexión de los detonadores, el armado del circuito y el acto de la detonación.

---

<sup>4</sup> TBM: *Tunnel boring machine*, máquina perforadora de túneles.

<sup>5</sup> Jumbo: Equipo usado en la minería para realizar perforaciones, el cual puede tener de 1 a 3 brazos para perforar.

7. Actividad n°7 Retiro equipo de carguío: Corresponde al retiro del equipo de detonación de la frente a volar.
8. Actividad n°8 Quemada: Es la acción de evacuación, preparación y ejecución de la voladura de la frente.
9. Actividad n°9 Ventilación y chequeo de gases: Después de una voladura se generan gases tóxicos por lo que es necesario esperar un tiempo para que se ventile el sector de trabajo antes de poder reingresar.
10. Actividad n°10 Regado de marina y drenaje: Consiste en regar el material tronado y esperar que el agua se drene completamente.
11. Actividad n°11 Retiro de marina: Es la acción de sacar el material rocoso que queda en el frente posterior a una voladura. El material es recogido con una pala de bajo perfil llamado scoop que coloca el material sobre un camión tolva o dumper<sup>6</sup>, o dejado de forma momentánea en una estocada<sup>7</sup>.
12. Actividad n°12 Acuñaadura: Se denomina a la acción de golpear la roca con una barretilla metálica. Esta acción tiene el propósito de provocar la caída de rocas sueltas en el túnel que aún no se hayan desprendido. La acuñaadura se realiza la mayoría de las veces sobre una plataforma protegida que está montada en un equipo de levante (manipulador).
13. Actividad n°13 Marcación de orificios: Se refiere a la acción marcar con pintura el lugar donde deberían ir las perforaciones que ejecutará posteriormente el Jumbo electrohidráulico. Estas perforaciones tienen por objetivo final ser el lugar donde se colocarán los pernos para la fortificación.
14. Actividad n°14 Instalación equipo de perforación: Consiste en instalar el jumbo en su posición de trabajo junto a todos los consumibles necesarios.
15. Actividad n°15 Perforación orificios: Se refiere a la acción de realizar perforaciones con el Jumbo electrohidráulico, con la finalidad de la posterior instalación de pernos.
16. Actividad n°16 Colocación de pernos: Se refiere a la acción de colocar lechada a presión o resina en las perforaciones, donde posteriormente se colocan pernos helicoidales. Esto tiene el fin de afirmar las rocas más débiles a las de mejor calidad, evitando posibles derrumbes. Para esta actividad se usa el mismo equipo de levante con plataforma que se usó en la acuñaadura.
17. Actividad n°17 Retiro equipo de perforación: Consiste en retirar el jumbo de su posición de trabajo para darle paso a la entrada de otros equipos a la frente de trabajo.
18. Actividad n°18 Colocación de malla: Se refiere a la acción de colocar e instalar una malla ACMA o tipo bizcocho con equipo de levante en el perímetro del túnel, con el fin de

---

<sup>6</sup> Dumper: Camión de bajo perfil usado en minería subterránea capaz de transportar importantes cantidades de peso.

<sup>7</sup> Estocada: Sector dentro de un túnel que sirve para dejar marina que no interrumpe el normal flujo de los equipos dentro de la mina o el túnel.

evitar el desprendimiento de rocas de pequeño tamaño. Además, de usarse hormigón proyectado le da la resistencia a la tracción.

19. Actividad n°19 Colocación de shotcrete: Es la acción de lanzar hormigón proyectado a presión sobre las paredes del túnel. Esto tiene la finalidad de dar mayor resistencia al túnel en su totalidad. Para realizar esta actividad se puede usar un robot automatizado o una bomba de hormigón con proyección manual.

Del análisis del ciclo del túnel se puede observar que casi todas las actividades necesitan de algún equipo mayor para ser ejecutadas. Los equipos mayormente utilizados son jumbos, scoop, camiones tolva o dumper, entre otros.

### **2.1.3 Maquinaria**

En la ejecución de proyectos mineros, específicamente para la construcción de túneles, la empresa utiliza maquinaria que le permita ejecutar actividades en forma segura y confiable. La maquinaria pesada (equipo mayor) que posee la empresa se compone principalmente de: jumbos, scoops y dumpers.

A continuación se realiza una descripción de los equipos mineros que serán objeto de estudio.

a) Jumbo:

Equipo electrohidráulico de perforación utilizado en minería subterránea, el cual se encuentra articulado en su parte central para un mejor manejo en el interior de la mina (ver figura 2.2). En su estructura este equipo consta en su mayoría de 2 brazos accionados mediante un sistema hidráulico, en el extremo de cada brazo se encuentra equipado con perforadoras hidráulicas que realizan movimientos de rotación, percusión y avance. Su objetivo es realizar perforaciones en la roca de acuerdo a los diagramas de disparo o de fortificación para obtener extracción de mineral a través de tronadura (detonación de explosivos) y a la vez obtener avance en los túneles de acceso en el interior de la mina.

Su función comienza al inicio de la construcción de galerías, perforando la frente marcada para el futuro carguío de explosivo y detonación de este, para de esta forma tener un avance lineal de la frente y desarrollo de la galería. Su siguiente utilización es cuando se debe acuñar (desprender roca inestable haciendo cuña), este procedimiento se realiza con el Jumbo cuando el cerro está demasiado inestable como para que se realice de manera manual (por medio de un manipulador telescópico y personal capacitado para realizar esta función). Finalmente se encarga de perforar para la futura fortificación del túnel, perforaciones donde se instalarán los pernos necesarios para fortificar (darle resistencia al cerro por medio de pernos, malla y hormigón proyectado) y entregar de esta manera seguridad al interior de la mina, evitando la caída de planchones.



Figura 2.1 - Jumbo Rocket Boomer 282, fuente: Atlas Copco.

#### b) Scoop: Load Haul Dump (LHD)

Pala o más bien equipo de carga, traslado y descarga de mineral, de bajo perfil para baja altura (ver figura 2.3) que consta de una cabina dispuesta al centro del equipo donde el operador tiene acceso visual hacia adelante y atrás sin dificultad, además de encontrarse articulado en su parte central. Posee dos cilindros hidráulicos de levante, uno de volteo y un balde de carga, este equipo tiene dirección articulada comandada por cilindros hidráulicos.

Es el equipo encargado de la extracción de marina (roca triturada durante la tronadura) de la frente, paso fundamental para poder continuar en el avance del proceso continuo de construcción de túneles. La otra función importante que realiza es durante la limpieza de la pata (piso) una vez que se realiza la acuñadura, ya que es necesario extraer de la frente la roca inestable que se desprendió luego de haberse acuñado la galería.



Figura 2.2 - Scoop ST-1030, fuente: Atlas Copco.

#### c) Dumper:

Camión de transporte de mineral de bajo perfil (ver figura 2.4), el cual es utilizado para el traslado de mineral ya sea a cortas como a grandes distancias. La estructura de esta máquina posee la característica de ser articulado en su centro, además se compone de dos partes, una correspondiente a la parte motriz y la otra corresponde a una tolva abatible en su parte posterior para el acarreo de mineral.

Es el equipo encargado del traslado de la marina desde la frente hasta el lugar de acopio o directamente hacia los puntos de vaciados, punto fundamental para mover las grandes masas de marina o mineral que quedan después de la tronadura o voladura del cerro.



Figura 2.4 - Dumper C-430, fuente: Caterpillar.

## 2.2 El método Rapid Mine Development (RMD)

Durante los últimos 2 años Codelco y numerosas empresas constructoras especializadas en el rubro de la construcción de túneles en Chile, han realizado varias visitas a las instalaciones australianas de la Mina Cadia East con el objetivo de conocer las estrategias utilizadas por la empresa Newcrest Mining y condiciones necesarias para la aplicación de la metodología de desarrollo rápido en la construcción de túneles de gran sección y frente única (metodología denominada Rapid Mine Development), implementada en el proyecto Cadia East, y cuya experiencia y resultados hoy se extrapolan al desarrollo de frentes múltiples en la misma faena, que ha tenido excelentes resultados operacionales duplicando su productividad. La idea de Codelco a través de sus empresas contratistas es implementarlo a corto plazo en la construcción de túneles en los distintos proyectos nacionales para mejorar la eficiencia.

Este método consiste básicamente en organizar los recursos destinados al desarrollo de un túnel, bajo el concepto de maximizar la utilización de la frente y optimizar las operaciones unitarias y ciclo global de trabajo, empleando tecnologías de vanguardia que cautelen la seguridad.

### 2.2.1 Proyecto Cadia East

El proyecto Cadia East considera explotar un cuerpo mineralizado, ubicado al este del Cadia Hill (figura 2.5).



Figura 2.5 - Ubicación geográfica proyecto Cadia East, fuente: Cadia East Project.

Las reservas alcanzan a 960 [m], con una ley de 0,61 gramos de oro por tonelada y 0,33 % de cobre, equivalentes a 18,7 millones de onzas de oro y 3,2 millones [ton] de cobre fino. Su producción en régimen, es de alrededor de 72.000 [tpd]. El método de explotación utilizado es Panel Caving con malla de 30 x 18 [m]. En la figura 2.6 se muestran el isométrico del proyecto, circunscrito en el distrito minero de Cadia Valley.

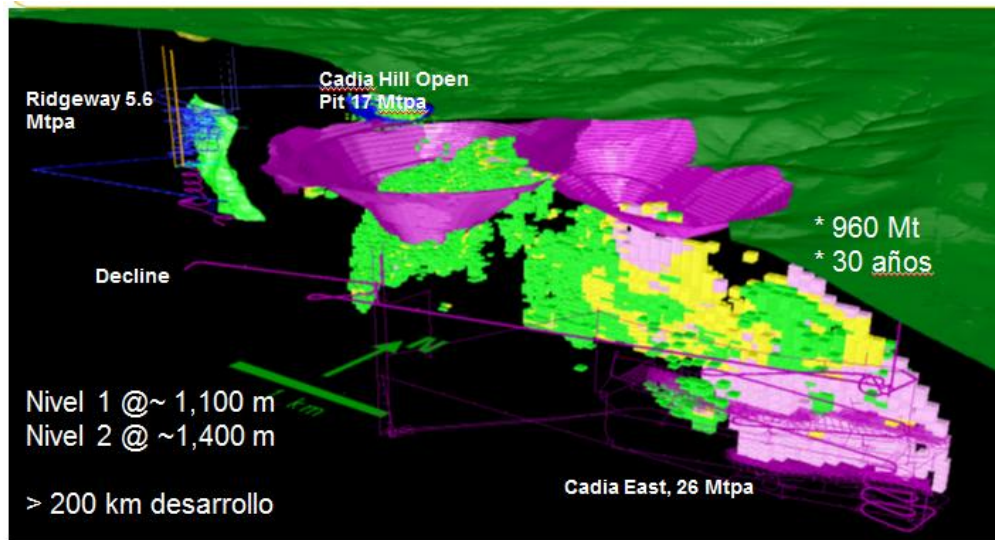


Figura 2.6 - Distrito minero de Cadia East Valley, fuente: Cadia East Project.

### 2.2.2 Descripción del método

Dentro de las consideraciones de mayor relevancia que utiliza este método se destacan las siguientes:

- Se basa en perforación de tiros largos, utilizando perforadoras de alta frecuencia, sistema láser para alineamiento de equipos de perforación.
- Utilización de equipos de carguío y transporte de gran capacidad, para minimizar el tiempo de marina.
- Uso de emulsión, baja generación de gases, disminución del tiempo de ventilación entre ciclos.

Cabe mencionar que el método surge ante la necesidad de enfrentar un desafío minero de gran envergadura, con plazos acotados, bajos rendimientos y altos costos de contratistas, problemas culturales y los apremios propios generados por la necesidad de reemplazar la producción en agotamiento, para el mantenimiento del negocio en forma eficiente y rentable.

Dada las dificultades para cambiar formas culturales y condiciones como, sistemas de remuneraciones, leyes laborales, relaciones con sindicatos, ética del trabajo, sistemas de trabajo y otros, esta metodología se orienta en intervenir y cambiar aquello relacionado con la tecnología, equipos y, en definitiva, se sustenta en los siguientes conceptos generales:

- Seguridad en la producción.
- Adecuada Selección del Personal.
- Definición de equipos y tecnologías adecuadas y de mayor eficiencia.
- Análisis y gestión de los tiempos de retrasos.
- Maximización de la utilización de la frente.
- Establecimiento de relaciones de cooperación y confianza con proveedores de equipos.
- Tipo de roca, competente y estable.
- Planificación focalizada en mantener frente de trabajo con una alta y eficiente utilización.
- Revisión constante del ciclo minero para eliminar tiempos muertos.
- Alta disponibilidad mecánica de equipos mineros.
- Alianza estratégica con proveedores de equipos.
- Perforación de avance de gran longitud.
- Perspectiva económica juega un rol importante, para definir aplicación de esta metodología.
- Revisión del diseño minero, incorporando elementos que permiten optimizar el tiempo de ciclo en fortificación, con la incorporación del uso de resina, shotcrete con fibra y equipos mecanizados con tecnología de punta asociados a estas innovaciones.
- Aplicación de emulsión bombeable que permita mejorar el tiempo de tronadura y ventilación.
- Comunicación “on line” con la frente de trabajo.
- Aplicación de hormigón proyectado para bóveda con marcos metálicos.

### **2.3 Simulación de operaciones**

“La Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo experiencias con el mismo con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o de evaluar nuevas estrategias para el funcionamiento del mismo. La Simulación puede ser realizada manualmente o por computador, aunque siempre implica la reproducción de una historia artificial del sistema.” Law & Kelton (2000).

En algunos casos, es posible realizar experimentos sobre un sistema real, donde la simulación no es necesaria. Pero en otros casos, no se puede trabajar con el sistema real, porque éste es muy grande, muy costoso o inmanejable y es necesario construir un modelo que simule el comportamiento del mismo. Una vez construido el modelo se simula para sacar conclusiones que sean aplicables al sistema real. Las diferentes formas de estudiar un sistema se resumen en la Figura 2.7.

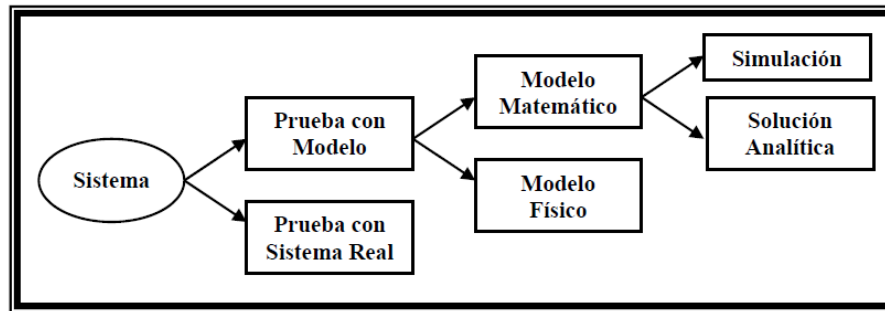


Figura 2.7 - Formas de estudiar un sistema, fuente: Law y Kelton (2000).

Un modelo es un conjunto de suposiciones estructuradas acerca del funcionamiento de un sistema. Estas suposiciones se expresan mediante relaciones lógicas, matemáticas y simbólicas entre los objetos del sistema. En algunos casos, el modelo es una réplica exacta, aunque sea a escala, del sistema real. En la mayoría de los casos, se trata tan sólo de una simplificación aproximada.

Una vez validado un modelo construido, se puede utilizar para estudiar las consecuencias de modificaciones que se realicen en sistemas que ya existen o para decidir el diseño más correcto de sistemas que aún no están construidos. Para ello se simulan distintas políticas y escenarios, de tal manera que se pueda estudiar la respuesta del sistema ante las distintas posibilidades que se puedan presentar.

### 2.3.1 Características de sistemas y modelos

Un Sistema es un conjunto de elementos relacionados que, dependiendo unos de otros, interactúan para alcanzar un objetivo. Un modelo es una representación simplificada de un sistema con el objeto de estudiarlo. El grado de simplificación debe adaptarse al objetivo con el que se construye el modelo, que puede ser el de comprenderlo o el de realizar predicciones.

Los sistemas y los modelos se pueden clasificar según criterios muy distintos (ver ANEXO 3 para más detalle):

- Estáticos o Dinámicos
- Determinísticos o Estocásticos
- Discretos o Continuos
- Abiertos o Cerrados

### 2.3.2 Razones y objetivos para simular

A continuación se presentan varias razones y objetivos importantes que promueven la realización de la simulación de operaciones.

- Estudio de las consecuencias al modificar estructuras o entornos de un sistema.
- Modificaciones aparentemente sencillas pueden tener consecuencias inesperadas debido a la interrelación entre las variables, la presencia de no linealidades o la existencia de retrasos.
- Adquisición de conocimiento sobre el funcionamiento de un sistema.
- Un modelo que ofrezca garantías puede servir para realizar predicciones, tales como la altura necesaria en una determinada viga para aguantar los esfuerzos a los que va a ser sometida.
- Se pueden experimentar nuevas políticas, formas de operación, reglas de decisión, flujos de información, sin interferir en el funcionamiento del sistema real.
- Se pueden definir nuevos “layout”, disposición de maquinarias, sistemas de transporte, etc. o la respuesta de los ya existentes en nuevos escenarios. La utilización de modelos fomenta la experimentación de nuevas alternativas, ya que, en la mayoría de los casos, no resulta costoso explorar esas nuevas posibilidades.
- El tiempo de simulación puede ser ralentizado y/o acelerado, de tal manera que no es necesario esperar a que las consecuencias a determinadas acciones se produzcan.
- Se puede obtener información sobre la importancia y las interacciones entre las variables.
- Se pueden detectar cuellos de botella en los puntos donde se acumulen material, información, retrasos, etc.
- Se puede comparar el funcionamiento del sistema con lo que los individuos creen que es el funcionamiento del sistema.
- En algunos casos se pueden simular condiciones extremas.
- Se mantiene en todo momento el control sobre lo que se está simulando. Una simulación bien planteada permite detenerla en cualquier momento y reiniciarla posteriormente, pudiendo modificar incluso el valor de alguna variable.
- Una vez construido el modelo es sencillo probarlo en escenarios distintos. Se pueden estudiar las respuestas del sistema ante modificaciones en el entorno.
- Hay veces en las que no queda más remedio que simular, ya que hay razones que impiden cualquier otra aproximación al problema.

### 2.3.3 Problemas de la simulación

Aunque existen muchos beneficios al utilizar la simulación, también hay problemas que pueden impedir la realización de estudios de simulación, entre los que se encuentran:

- Necesidad de formación: Es necesario un periodo de preparación y adquisición de conocimientos.
- Interpretación de los resultados: Los resultados pueden ser complicados de interpretar.
- Existencia de métodos más sencillos: Puede existir una solución analítica que haga innecesaria la simulación.
- Validación complicada: La validación del modelo puede ser muy complicada, sobre todo por la carencia de datos históricos.
- Obtención de datos complicada: Obtener datos de las entradas puede ser complicado.
- Búsqueda de la solución óptima: Una vez desarrollado el modelo puede resultar largo dar con la solución óptima.
- Dificultad de aceptación: Las personas que no han participado en la construcción del modelo tienden a cuestionarlo si los resultados no son los esperados por ellos.
- Exceso de confianza: Falsa sensación de seguridad, producida a veces por la cantidad excesiva de resultados.

La simulación no debería ser utilizada cuando:

- El problema puede ser resuelto analíticamente.
- Es más fácil realizar experimentos directos en el sistema real.
- El costo de la simulación excede los posibles ahorros que resulten de ésta.
- Los recursos apropiados no están disponibles para el proyecto.
- No hay suficiente tiempo para que los resultados del modelo sean útiles.
- No hay datos, tampoco estimaciones.
- El modelo no puede ser verificado o validado.
- Las expectativas del proyecto no pueden ser alcanzadas.
- El comportamiento del sistema es demasiado complejo o no puede ser definido.

### 2.3.4 Simulación continua y simulación discreta

Existen dos tipos de simulación: simulación continua y simulación discreta. Las diferencias entre éstas se presentan en la tabla 2.1.

En simulación continua las variables cambian su valor de forma continua en el tiempo cada  $\Delta t$  y es imposible distinguir los elementos que circulan por el sistema. Normalmente, los problemas estudiados mediante simulación continua son amplios y complejos, y los resultados que se buscan son más tendencias que resultados numéricos exactos. Los modelos, en su nivel más bajo, están constituidos por sistemas de ecuaciones diferenciales, que se resuelven por métodos numéricos.

La simulación discreta suele estudiar problemas más reducidos, ofreciendo resultados más detallados. En los modelos de eventos discretos, las entidades discretas cambian su estado según los eventos que ocurren en la simulación. Órdenes llegando, partes ensamblándose, y clientes llamando son ejemplos de eventos discretos. El estado del modelo cambia sólo cuando esos eventos ocurren; el mero paso del tiempo no tiene un efecto directo. Una fábrica que ensambla partes es un buen ejemplo de un sistema de evento discreto. Las entidades individuales (partes) se ensamblan basadas en los eventos (recibo u órdenes anticipadas). El tiempo entre los eventos en un modelo de evento discreto raramente es uniforme. Es posible distinguir las entidades que circulan por el sistema y obtener una historia detallada de cada una de ellas. Los modelos discretos proporcionan habitualmente más detalles que los continuos, aunque su cálculo es más lento.

	<b>Continua</b>	<b>Discreta</b>
<i>Objetos del modelo</i>	Niveles y Flujos	Procesos, Colas e Ítems
<i>Tiempo</i>	Se repiten los cálculos periódicamente cada cierto intervalo de tiempo	El modelo se recalcula cada vez que sucede un evento
<i>Ordenación</i>	No se distingue	Puede ser FIFO, LIFO, Priorizada o Particular
<i>Estadísticas</i>	Sólo estadística general: Cantidad, eficiencia...	Además de las generales se puede estudiar cada ítem: utilizaciones, tiempos de espera...
<i>Usos habituales</i>	Científicos: Biología, química, física... Ingeniería: Electrónica, Sistemas de Control Dinámica de sistemas, Systems thinking	Producción Empresas de servicios Redes de ordenadores y comunicaciones

Tabla 2.1 - Comparación entre simulación continua y discreta, fuente: Law & Kelton (2000).

Según Serpell (1993) una operación en construcción “es aquella actividad de trabajo que resulta en la colocación o instalación de un elemento definible de construcción, para lo cual se incluyen algunos procesos tecnológicos y se tiene una estructura de tareas asignadas”. Luego, la simulación discreta es más apropiada para modelar operaciones de construcción

porque es más intuitiva y permite lograr el nivel de detalle necesario para la modelación de operaciones de construcción.

### **2.3.5 Desarrollo modelo simulación**

El desarrollo de un modelo de simulación no es sencillo por lo que requiere seguir una metodología estructurada para su construcción. Law y Kelton (2000) proponen 10 pasos para la construcción y utilización de un modelo de simulación, estos son:

#### 1. Formulación del problema

a) Identificar el problema de interés para el cliente

b) Coordinar reuniones con el administrador del proyecto y los expertos en simulación para conducir el estudio. Se deben discutir los siguientes aspectos:

- Objetivos generales del estudio.
- Problemas específicos a ser resueltos por el estudio.
- Medidas de desempeño que serán utilizadas para evaluar la eficacia de las diferentes configuraciones del sistema.
- Alcance del modelo.
- Configuraciones del sistema a modelar.
- Programa a utilizar.
- Tiempos para realizar el estudio y los recursos requeridos.

#### 2. Recolección de los datos y definición del modelo

a) Recolectar información del diseño del sistema y los procedimientos de operación:

- Ninguna persona o documento es suficiente por si solo.
- Algunas personas pueden tener información inexacta, hay que asegurarse de que los verdaderos expertos en el proceso han sido identificados.
- Podría darse que los procedimientos de operación no estén formalizados.

b) Recolectar información y especificar la distribución de probabilidades que siguen los parámetros e inputs del modelo.

c) Delinear la información recolectada y crear un “documento de supuestos”, el cual será el modelo conceptual.

d) Recolectar información de las medidas de desempeño en el sistema existente (con el fin de validar posteriormente el modelo en el paso 6).

e) El nivel de detalle del modelo debería depender de:

- Objetivos del proyecto.
- Medidas de desempeño.
- Datos disponibles.
- Preocupación de credibilidad.
- Limitaciones computacionales.
- Opiniones de los expertos en la materia.
- Limitaciones de tiempo y dinero.

f) No hay necesidad de que haya correspondencia uno a uno entre cada elemento del modelo y el correspondiente elemento del sistema.

g) Interacción con el administrador (y todo el personal clave del proyecto) en una base regular.

### 3. Validación del modelo conceptual

a) Se debe desarrollar una estructura lógica para revisar el modelo conceptual, utilizando el documento de supuestos, para luego generar una audiencia con el administrador, analistas y expertos del proyecto:

- Ayuda a asegurar que los supuestos del modelo son correctos y completos.
- Promueve la propiedad del modelo.
- Toma lugar antes de que la programación comience, para eliminar una reprogramación significativa después.

### 4. Construcción del modelo computacional y su verificación

a) Programar el modelo en un lenguaje de programación o en un programa de simulación. Es más conveniente usar programas de simulación ya que ahorran mucho tiempo y esfuerzo, lo que representa menor costo para el proyecto.

b) Verificar el correcto funcionamiento del modelo de simulación.

### 5. Ejecución de corridas piloto

a) Hacer corridas de prueba para validar el modelo en el paso 6.

### 6. Validación del modelo computacional

a) Si se trata de un sistema existente, se compara éste con el modelo de simulación, además se compara con las medidas de desempeño existentes del paso 2.

b) Sin excepciones, los expertos del proyecto y analistas deben revisar los resultados del modelo computacional y comparar considerando su experiencia, o el sistema existente en caso que haya uno.

c) Usar análisis de sensibilidad para revisar qué factores del modelo tienen un impacto significativo en las medidas de desempeño del modelo, luego éstos deben ser modelados cuidadosamente.

## 7. Diseño de experimentos

a) Especificar lo siguiente para cada configuración del sistema de interés:

- Largo de cada réplica de simulación.
- Largo del periodo de calentamiento del modelo, si se trata de un análisis para el largo plazo.
- Número de réplicas de simulación independientes usando diferentes números aleatorios, para construir intervalos de confianza.

## 8. Ejecución de corridas de producción

a) Realizar corridas de producción que serán usadas en el paso 9.

## 9. Análisis de los datos de salida

a) Los dos mayores objetivos en el análisis de datos son:

- Determinar las medidas de desempeño de ciertas configuraciones del sistema.
- Comparar alternativas de configuraciones del sistema.

## 10. Documentación presentación y uso de los resultados

a) Documentar los supuestos (ver el paso 2), el modelo computacional, y los análisis de resultados para usarlos en proyectos futuros.

b) Presentar los resultados:

- Usar animación para comunicar el modelo a los administradores y otras personas que no estén familiarizadas con todos los detalles del modelo.
- Discutir la construcción del modelo y el proceso de validación para promover la credibilidad.

c) Los resultados son usados en la toma de decisiones del proceso, si estos son válidos y creíbles.

### 2.3.6 Software de simulación

Para llevar a cabo este estudio es necesario contar con una herramienta potente capaz de modelar y resolver el modelo conceptual desarrollado. Para esto tras una gran revisión se ha decidido optar por el software de simulación *ARENA* en su más reciente versión, el cual dada su configuración y programación se adapta satisfactoriamente a las condiciones del proyecto.

El software *ARENA* trabaja en base a las siguientes partes:

a) Entidades:

Son los elementos que se mueven alrededor del sistema, cambiando su estado, afectando y siendo afectado por otras entidades. Las entidades son dinámicas: son creadas, se mueven en el sistema durante algún tiempo y son destruidas, cuando salen del sistema.

b) Atributos:

Para individualizar las entidades, estas tienen atributos, que es una característica de todas las entidades, pero con un valor específico que diferencia una entidad de otra. Ej: Identificador, hora de arribo, prioridad, color. El mismo atributo generalmente tiene distintos valores, para distintas entidades.

c) Variables Globales:

Es un pedazo de información que refleja alguna característica de un sistema, independiente de cuantas o de qué tipo de entidades se encuentren en el sistema. *ARENA* tiene 2 tipos de variables globales:

i) Las definidas por el *ARENA*. Por ejemplo: número en la cola, número de recursos ocupados, tiempo de simulación, etc.

ii) Definidas por el usuario. Por ejemplo: número en el sistema, etc.

Las variables, no especifican una entidad en particular, sino que especifican al sistema completo. Estas son accesibles por todas las entidades, y algunas pueden ser cambiadas por cualquier entidad. Son utilizadas para diferentes propósitos. Por ejemplo: se puede crear una llamada Número en el Sistema, cuyo valor indica el número de entidades en el sistema, incluyendo aquellas que se encuentran en las colas o las que están siendo atendidas en algún servidor. Cuando una entidad es creada se le suma 1 a la variable, y cuando ésta sale del sistema se le resta 1 a la variable.

d) Recursos:

Una entidad se apodera de un recurso cuando este se encuentre disponible y lo libera cuando termina de utilizarlo. Un recurso puede tener una capacidad variable, que puede ser modificada durante la simulación.

Los recursos pueden ser representados por un grupo de algunos servidores individuales, cada cual es llamado unidad.

## e) Colas:

Cuando una entidad no se puede mover, porque necesita el servicio de algún servidor, que en ese momento se encuentra ocupado sirviendo a otra entidad. Esta debe esperar en una cola. En ARENA, cada cola tiene su nombre, y se pueden definir su capacidad. Se debe manejar en el modelo, qué hacer cuando llega una entidad a la cola y esta se encuentra llena.

## f) Acumuladores Estadísticos:

Son variables que sirven para tener las medidas de rendimiento durante el proceso de simulación por ejemplo:

- Número de parte producidas hasta ahora.
- Tiempo total de espera en la cola hasta ahora.
- El tiempo máximo de espera en la cola hasta ahora.

Todos los acumuladores son inicializados en 0. ARENA tiene la mayoría de los acumuladores estadísticos, que uno quiera tener, pero la mayoría de estos son invisibles para uno.

## g) Eventos:

Es algo que sucede en un instante del tiempo de simulación, puede que cambie sus atributos, variables o acumuladores estadísticos. Ejemplo de 3 tipos de eventos:

Llegada: Una nueva entidad entra al sistema

Salida: La entidad sale del sistema.

Final: La simulación termina a los 15 minutos.

## h) Tiempo de Simulación.

El valor actual del tiempo de simulación se obtiene de una variable global, (TNOW).

### 2.3.7 Simulación Adoptada

La simulación que será llevada a cabo será del tipo de simulación discreta dinámica y determinista, dado que el modelo conceptual está desarrollado en base a eventos, por ejemplo, transporte de marina desde el frente de trabajo hacia punto de acopio; en este evento o actividad no se analiza lo que sucede entremedio, como sería el caso de una simulación del tipo continua, la cual está enfocada a modelar problemas físicos instante a instante.

Del tipo dinámico, ya que la variable tiempo interviene, incluso, es la variable predominante de este proyecto. Del tipo determinístico, ya que no contiene variables aleatorias, esto quiere decir que en todas las corridas simuladas, si no se modifica ninguna condición, se va a llegar al mismo resultado.

### 2.3.8 Conceptos estadísticos para la simulación

A continuación se enlistan los conceptos estadísticos utilizados en este trabajo (para más detalle ver ANEXO 4):

- Medida de Dispersión
- Varianza
- Desviación estándar
- Intervalo de confianza
- Intervalo de confianza para la media  $\mu$
- Prueba de Hipótesis
- Hipótesis estadísticas
- Hipótesis simple y compuesta
- Hipótesis nula y alternativa
- Prueba de una hipótesis estadística
- Prueba de bondad de ajuste
- Prueba Kolmogorov Smirnov (KS)
- Prueba Chi cuadrado ( $\text{Chi}^2$ )
- Distribución triangular

## Capítulo 3. Desarrollo

### 3.1 Análisis de resultados del Método RMD

A continuación se desarrolla un análisis de los resultados de este método en el proyecto Cadia East.

#### 3.1.1 Sub Etapa de Perforación

En el proyecto se utilizó un jumbo de 2 brazos modelo L2C30, perteneciente a Atlas Copco, los diagramas de perforación fueron para 68 tiros y 4 huecos, se logró reducir el número de ciclos de desarrollo hasta en un 35%, al igual que la sobre-excavación que se redujo a 10%, con relación a los 15 a 20% de la metodología convencional. Se utilizó alineamiento laser, lo que eliminó la necesidad de marcar la frente con pintura.

La perforadora utilizada fue una COP 3038, primer lugar en Australia, la que logró un rendimiento de 5,3 [m/min] a través de roca granito, con lo que se logró un menor costo por metro y un incremento en el avance de un 50% en relación al COP1838. Los bits usados son de 48 ó 51 [mm].

En cuanto a la tecnología se utilizó el sistema RCS, el cual permite que todos los tiros sean perforados del mismo largo, también el sistema ABC Total, que logró un 70% de perforación automática. Se optimizó la perforación a través del uso del software Tunnel manager.

A continuación, en la figura 3.1, se muestra un gráfico comparativo del ciclo tradicional de 3,5 [m] de avance versus el tiempo demorado con las nuevas mejoras. Se logra apreciar que con la utilización de un jumbo de mayor capacidad se mantiene similar el tiempo de ejecución, pero se logra un notable avance a 5,4 [m] por sobre los 3,5 [m] tradicionales, es decir, se logra un avance lineal de 1,9 [m] por disparo.

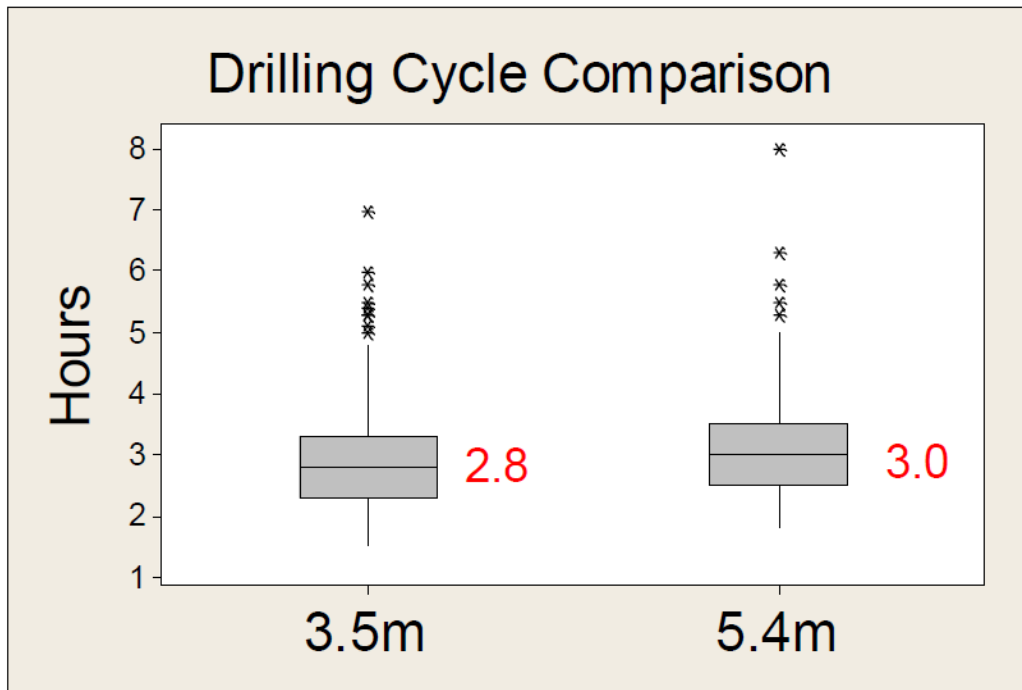


Figura 3.1 - Gráfico comparativo ciclo perforación, fuente: Cadia East Project.

### 3.1.2 Sub Etapa de Carguío y tronadura

Dentro de este proceso se utilizó explosivo de emulsión, lo que permite reducción del 10% de los tiros. Se logró una baja generación de NOX y CO, lo que permite una rápida re-entrada y ventilación (75% respecto a explosivos convencionales).

En general el uso de emulsión muestra mejoras de la manipulación y hay efectivos resultados del control del contorno de la tronadura.

A continuación, en la figura 3.2, se muestra un gráfico comparativo del ciclo tradicional de 3,5 m de avance versus el tiempo demorado con las nuevas mejoras. Se logra apreciar que con la utilización de emulsión se mantiene igual el tiempo de ejecución pero se logra un notable avance a 5,4 [m] por sobre los 3,5 [m].

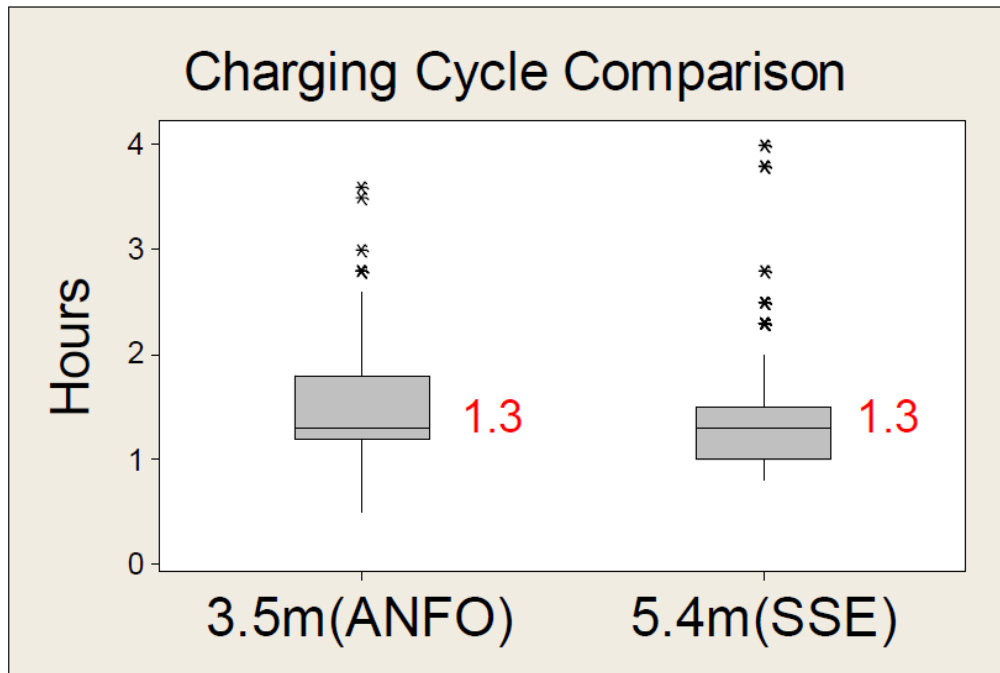


Figura 3.2 - Gráfico comparativo ciclo carguío, fuente: Cadia East Project.

### 3.1.3 Sub etapa de Extracción y transporte de marina

Con el uso de camiones y cargadores de grandes dimensiones (mayor capacidad y alta velocidad) se lograron menos viajes por ciclo desarrollo/pases. La extracción de marina se realiza en 2 etapas, la primera etapa retira 2/3 de la marina, posteriormente se fortifica con shotcrete.

En relación a los cargadores se seleccionaron un 25% más rápido y capacidad 25% mayor que competidor más cercano. Como el modelo de Atlas Copco 5010 y MT6020 de 50 y 60 [ton], con motor de 650 a 750 [hp], velocidades de 13 [km/hr] y los modelos Sandvik 0011 de 21 [ton], Sandvik L621 de 21 [ton] y Sandvik T11 de 21[ton].

Se utilizaron scoop y camiones equipados con “sintered metal filter”, filtros que eliminan el material particulado y humos de combustión, mejorando ventilación.

Las estocadas de marina se fijaron cada 200 [m], de un disparo de 5,5 x 6,0 [m]. Se extrajo entre 10 a 12 camionadas (3 o 4 vueltas flota).

A continuación, en la figura 3.3, se muestra un gráfico comparativo del ciclo tradicional de 3,5 m de avance versus el tiempo demorado con las nuevas mejoras. Se logra apreciar que con la utilización de estos equipos se mantiene casi igual el tiempo de ejecución pero se logra un notable avance a 5,4 m por sobre los 3,5 [m].

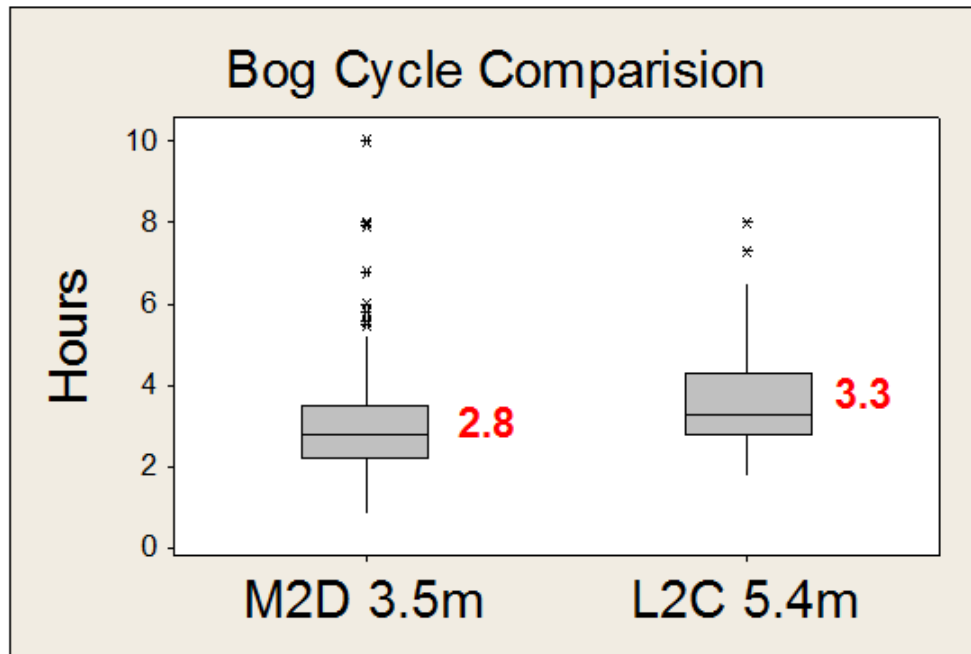


Figura 3.3 - Gráfico comparativo ciclo tronadura, fuente: Cadia East Project.

### 3.1.4 Sub etapa de Fortificación

En la fortificación se utilizaron pernos galvanizados de 2,4 [m] de largo y 27 [mm] de diámetro, en promedio 9 pernos por parada (1,5[m] x 1,5 [m]). Se colocaron con resina logrando un fraguado inmediato, desarrollando rendimientos de 145 [pernos/turnos] (9 pernos/45 minutos).

El shotcrete se transportó en camiones mixer de 8 y 12 [m<sup>3</sup>] con proyección automática.

Cuando fue necesario el uso de cables, se desarrollaron perforaciones de 51 [mm] en longitud del cable, variando desde 4,5 a 18 [m].

En cuanto a tecnología el equipo utilizado fue un Jumbo Atlas Copco L2 Cabletec de dos brazos separados (uno para la perforación y para insertar un cable o lechada).

### 3.1.5 Resultados del método

El método de desarrollo rápido de túneles como su nombre lo señala, focaliza su filosofía en lograr los tiempos más cortos posibles, lo que se traduce en mayor avance diario. En la figura 3.4, se aprecia la transición de metodología tradicional pasando por un periodo de falla para luego llegar a los niveles obtenidos con el uso del método. Cada línea muestra distintos períodos de toma de datos de terreno. El análisis fue realizado en un período de un mes. Se visualiza una zona de falla la que equivale a una zona de transición entre uno y otro método.

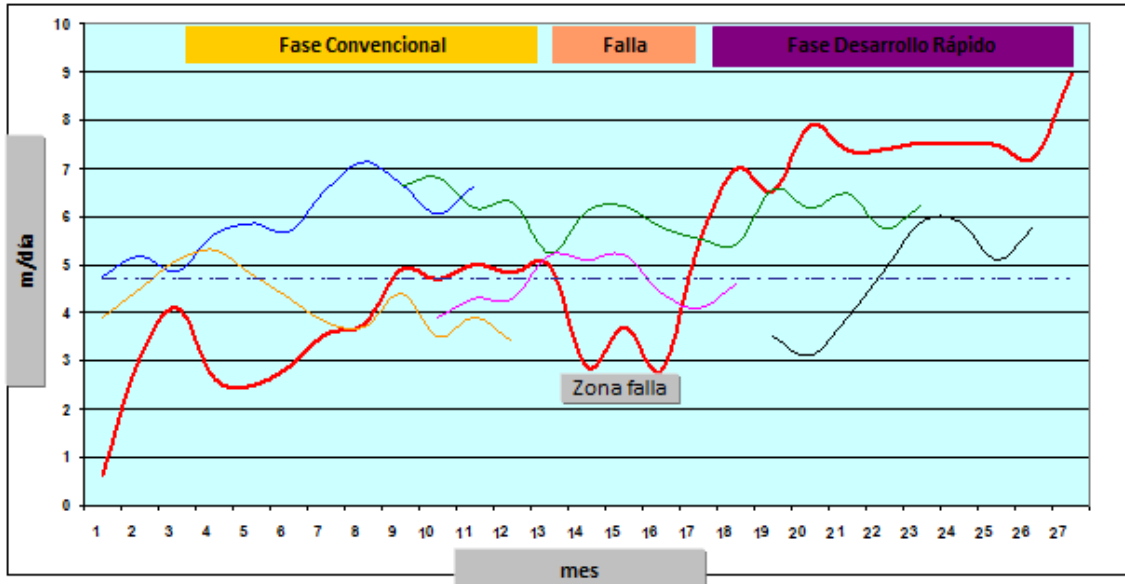


Figura 3.4 - Gráfico avance mensual, fuente: Cadia East Project.

En el gráfico de la figura 3.5 se muestra la comparación por ciclo, en el cual la referencia de la competencia se sitúa muy por debajo de los resultados obtenidos por el método RMD, logrando un 60% más, lo que se traduce en mayor productividad para la empresa.

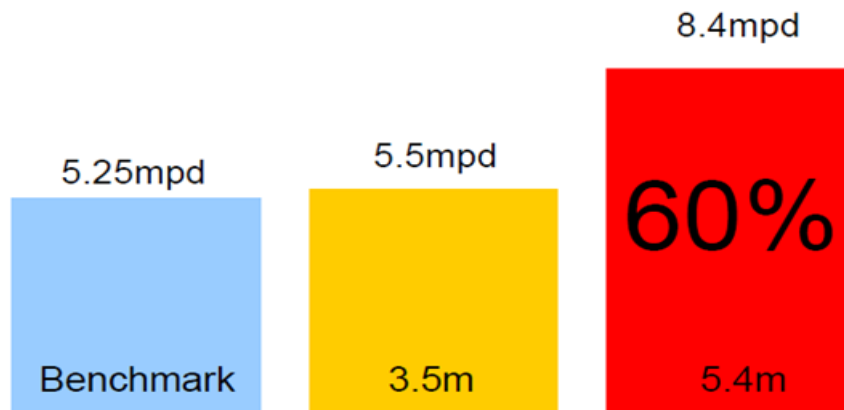


Figura 3.5 - Gráfico avance diario, fuente: Cadia East Project.

En la figura 3.6 se muestran los tiempos desglosados para las distintas fases que componen el ciclo total. Se aprecia que los tiempos de cada fase son bastante bajos respecto de los tiempos muertos y pérdidas. La explicación de ello podría estar en la breve planificación además del componente humano.

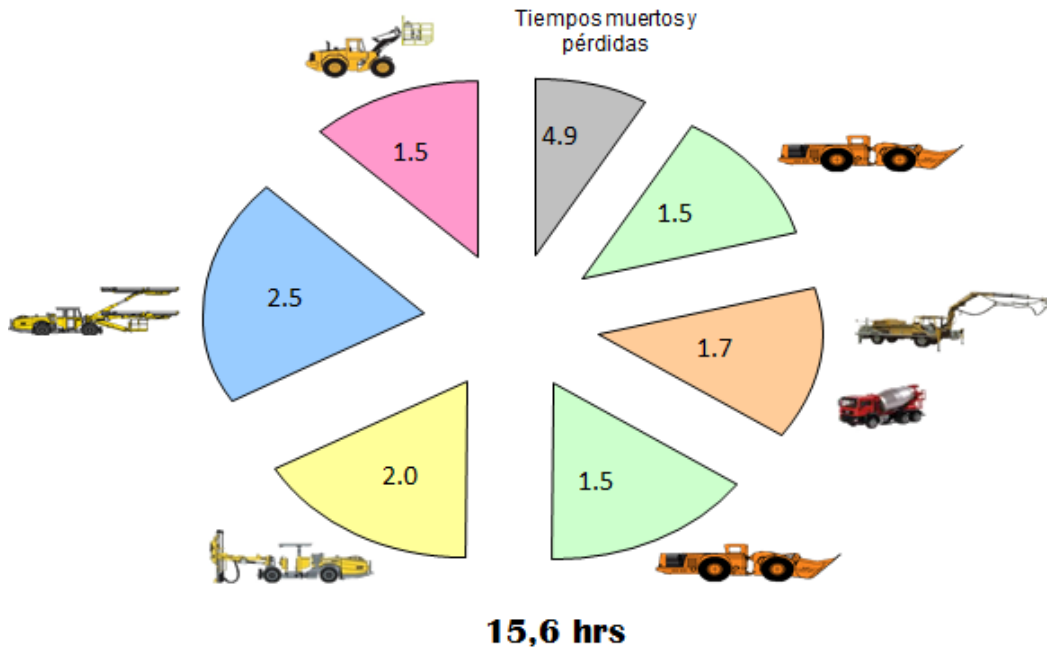


Figura 3.6 - Desglose de tiempos del ciclo completo, fuente: Cadia East Project.

A continuación en la figura 3.7 se presenta la mejor muestra de los resultados del método de desarrollo rápido versus el desarrollo tradicional, reflejando que en tiempos similares, Se observa que el método RMD supera con creces los metros de avance del ciclo en desarrollo convencional.

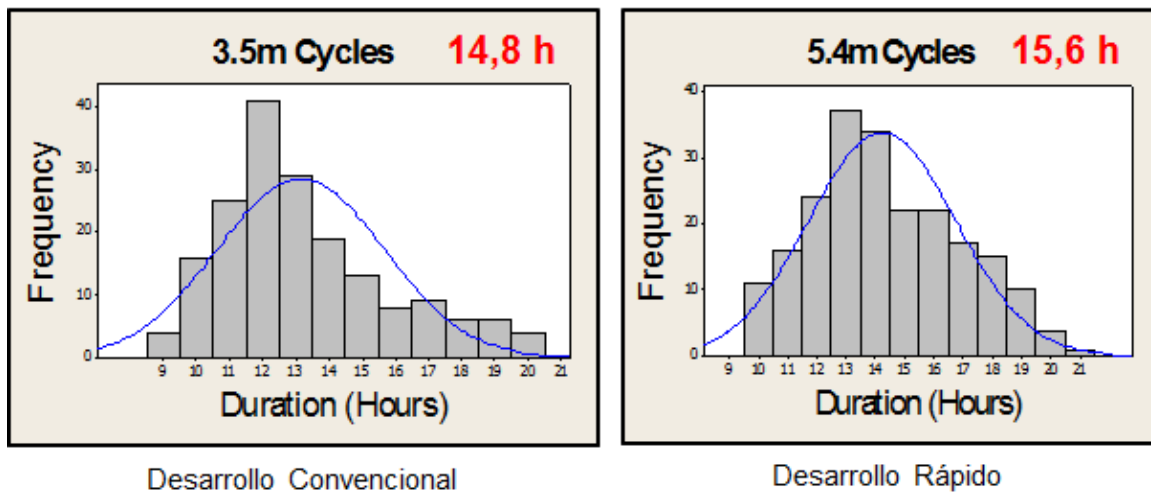


Figura 3.7 - Gráfico comparativo de método RMD v/s método convencional, fuente: Cadia East Project.

No solo es importante lograr aumento en los avances diarios sino también mejorar la seguridad en la construcción. En esto, el método RMD no se queda atrás, destacando proyectos sin la ocurrencia de accidentes con tiempo perdido, todo esto gracias a procesos simples y mecanizados.

En resumen el método RMD es más rápido (figura 3.8) con un promedio de 260 [m/mes] y un peak de 311 [m], mejor seguridad y a un menor costo (figura 3.9).

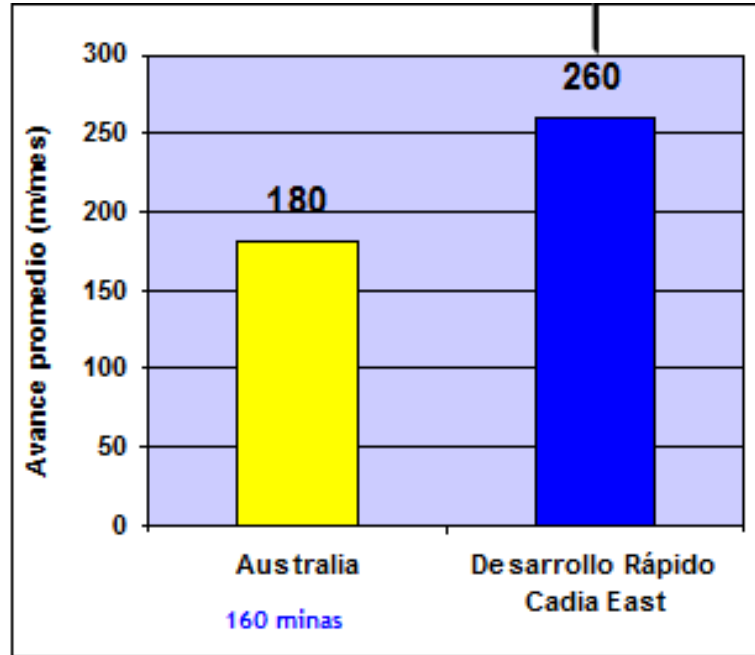


Figura 3.8 - Gráfico avance promedio mensual, fuente: Cadia East Project.

Desarrollo (sección de 5,5 x 6,0 m)	Costo (US\$/m)
Newcrest: Desarrollo Rápido	4.500
Newcrest: Desarrollo Convencional	5.500-6.000
Contratista: Desarrollo Convencional	7.000-7.500

Figura 3.9 - Costos mensuales de desarrollo, fuente: Cadia East Project.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende, a través del modelo de simulación construido, estimar porcentajes teóricos de aumento de productividad al incorporar equipos de mayor tecnología y prestaciones contrastándolos con los resultados obtenidos utilizando el modelo de simulación del método tradicional.

Los resultados operacionales del método aplicado al proyecto de Cadia East son una buena referencia para tener ante una eventual implementación del método en una empresa constructora en Chile.

### 3.2 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en el desarrollo y explotación de un nuevo nivel de explotación minera denominado Nuevo Nivel Mina (NNM), en la actual Mina El Teniente, en la comuna de Machalí, provincia de Cachapoal, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, con el objetivo de mantener la capacidad de procesamiento de mineral en 131.000 [tpd] y asegurar la continuidad operacional de la División el Teniente (DET) hasta el año 2064. El proyecto profundiza la actual mina subterránea a la cota 1.880 [m.s.n.m.], generando una nueva infraestructura de apoyo a la producción, de accesos, de manejo de aguas, y de transporte de mineral, materiales y recursos humanos.

El objetivo del Proyecto NNM es asegurar la continuidad operacional de la División El Teniente, incorporando a la explotación minera nuevas reservas de mineral que reemplazan las reservas de los sectores productivos actuales, satisfaciendo con ello los objetivos de negocio de CODELCO Chile en el mediano y largo plazo.

Para lograr el objetivo anterior es necesario preparar los desarrollos horizontales y verticales necesarios en forma oportuna. Por lo que incorporar nuevas metodologías constructivas abre una gran oportunidad para la inclusión del método RMD en este gran proyecto.

Después de un largo análisis de los distintos túneles actualmente en construcción, se decide aplicar el método al túnel de acceso personal denominado TAP (ver figura 3.10), dado que presenta las condiciones ideales para la aplicación del método.

Como breve descripción del TAP su finalidad es ser un acceso desde la superficie (Caletones) hacia interior mina cota 1880 [m.s.n.m.] Se contempló en su diseño una doble vía para buses, su objetivo es mejorar la movilidad de los trabajadores reduciendo considerablemente los tiempos actuales de viaje (aproximadamente 1 hora y media).



Figura 3.10 - Fotografías túnel de acceso personal, fuente: Codelco.

La longitud del túnel completo es de 8500 [m] lineales, de los cuales 450 [m] lineales corresponden al contrato adjudicado por la empresa constructora en el cual se hará el estudio.

En la figura 3.11 se muestra un esquema completo del túnel a construir:

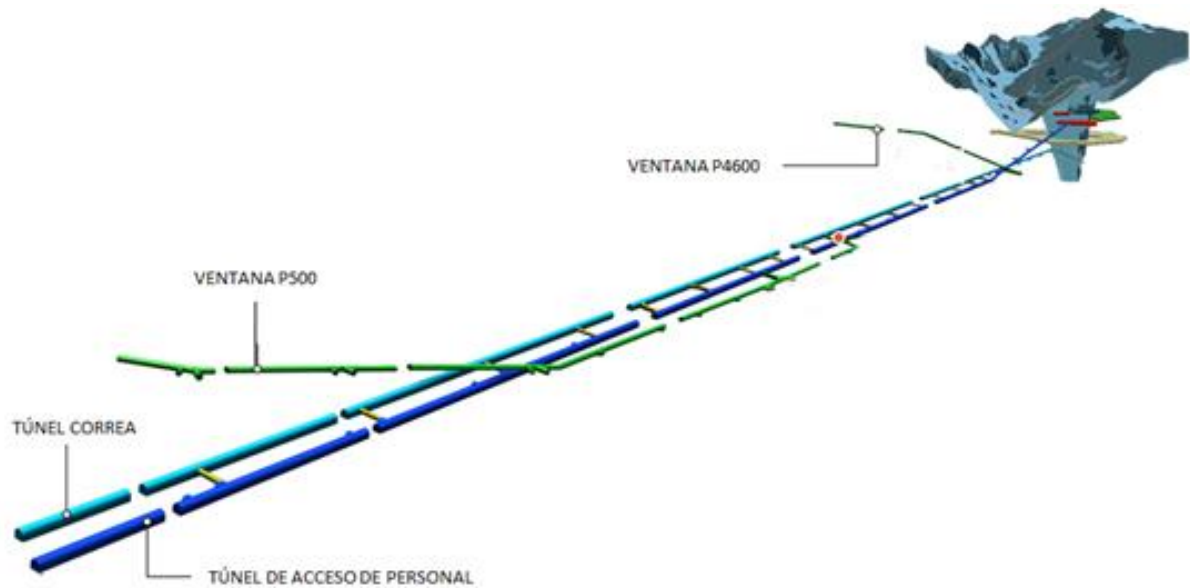


Figura 3.11 - Esquema del proyecto, fuente: Codelco.

Se presenta, en la figura 3.12, el mapa litológico del proyecto NNM:

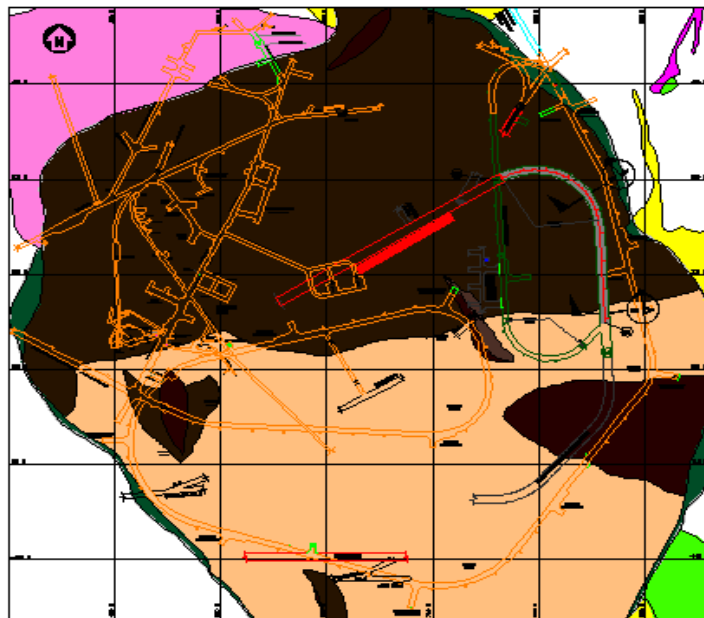


Figura 3.12 - Mapa litológico del proyecto, fuente: Codelco.

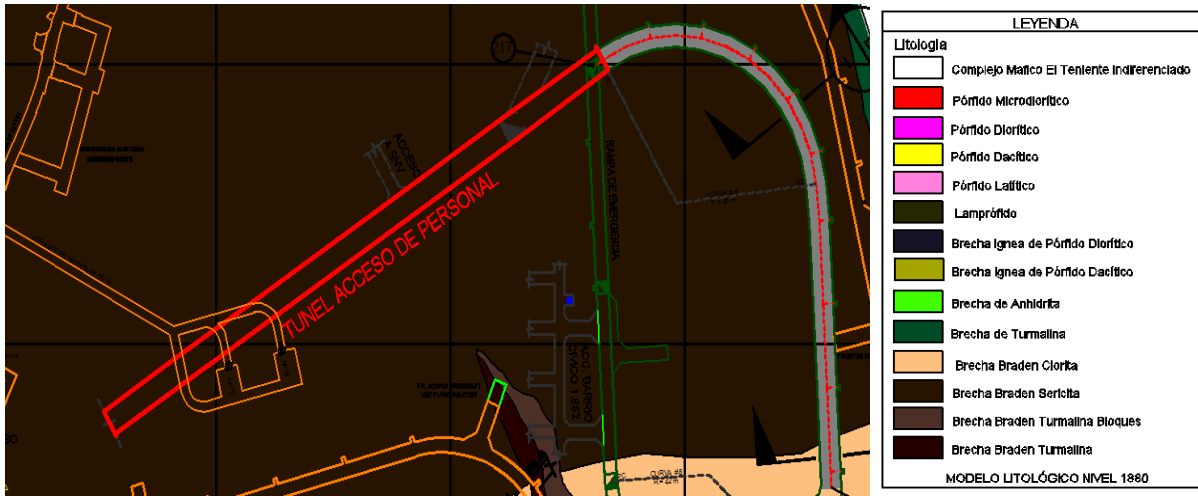


Figura 3.13 - Acercamiento mapa litológico con su leyenda, fuente: Codelco.

En la figura 3.13 se muestra un acercamiento del mapa litológico donde se puede visualizar el túnel en estudio. Además se puede apreciar a partir del mapa y la tabla adjunta que la totalidad del túnel se encuentra compuesta por roca tipo Brecha Braden, la cual es un macizo rocoso estéril (sin material cuprífero) de gran dureza. Se debe tener presente que el método RMD plantea dentro de su filosofía de aplicación contar con un tipo de roca competente, condición que se cumple satisfactoriamente en este caso.

En las figuras 3.14 y 3.15 se describen la sección y perfil del TAP, en las cuales se aprecian sus dimensiones principales:

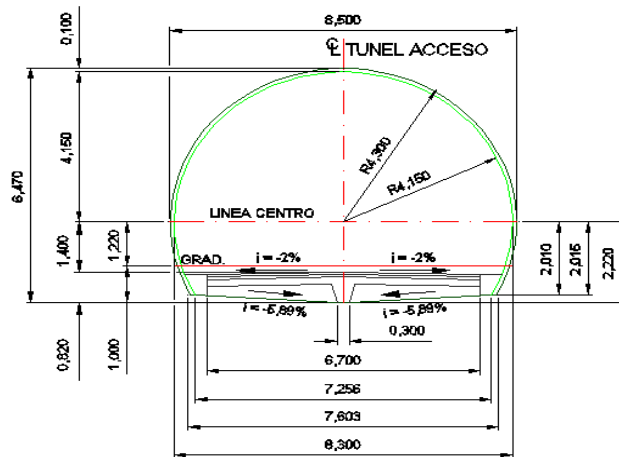


Figura 3.14 - Sección del túnel TAP, fuente: Codelco.

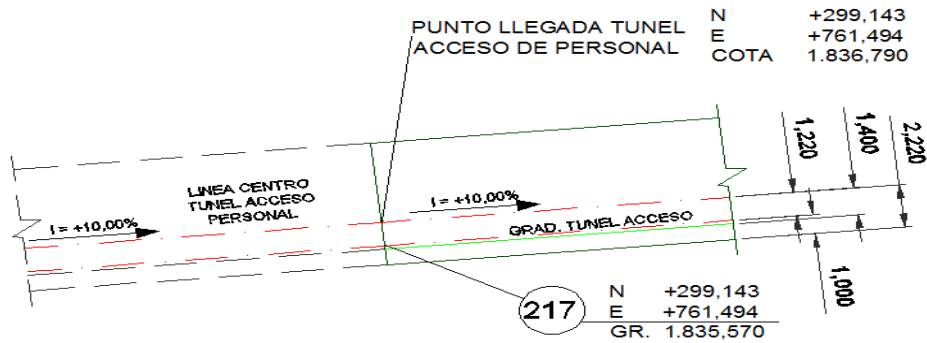


Figura 3.15 - Perfil del túnel TAP, fuente: Codelco.

De las figuras anteriores se puede extraer que el área del túnel es de  $46,35 \text{ [m}^2\text{]}$ , área considerada de gran sección (también condición imperante para la aplicación del método RMD).

Haciendo un análisis topográfico se estima que la longitud del túnel incluido en el contrato es de aproximadamente  $450 \text{ [m]}$  lineales, mientras que el proyecto completo es de  $8500 \text{ [m]}$  lineales.

### 3.3 Análisis comparativo de metodología tradicional versus RMD

A continuación se realiza un análisis comparativo de cada actividad con el fin de visualizar las diferencias entre ambas metodologías, se puede visualizar el ciclo de construcción en las figuras 3.16 y 3.17:

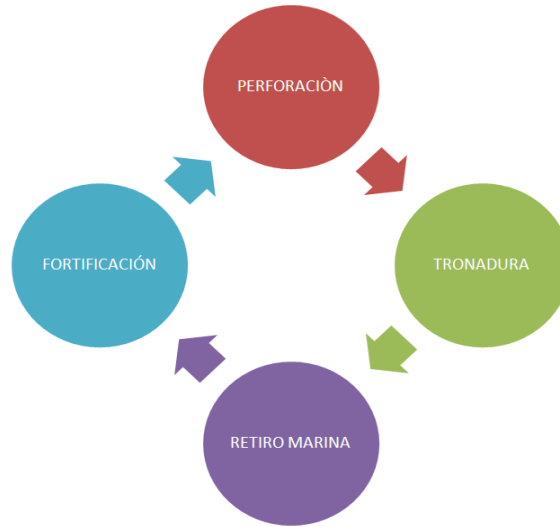


Figura 3.16 - Esquema de sub-etapas del ciclo de construcción, fuente: elaboración propia.



Figura 3.17 - Esquema de sub-etapa detallado, fuente: elaboración propia.

1. Marcación de la frente:

i) *Método tradicional:* Se utiliza pintura roja y dos operarios, un topógrafo y un alarife, el primero a través de una estación total determina el lugar geométrico a perforar, luego el otro operario marca dicho punto con pintura roja, para que posteriormente el jumbo perfora el lugar. De acuerdo a tomas de datos de terreno en promedio se demoran 10 segundos por marcación de agujero, esta frente en particular son 127+2 perforaciones. Lo que resulta en 21,5 minutos destinados a dicha actividad.

ii) *Método RMD:* El método sugiere la utilización de jumbos de última generación los que cuentan con sistema ABC TOTAL (Advanced Boom Controls) básicamente consiste en una alineación láser, es decir, el jumbo computarizado tiene precargado en su sistema el diagrama de disparo el cual es proyectado en la frente a través de varios láser. Reduciendo el tiempo de marcado de frente a 0 min.

2. Instalación equipo de perforación:

El tiempo de instalación es idéntico para ambos métodos.

3. Perforación de la frente:

i) *Método Tradicional:* El método tradicional utiliza un equipo Jumbo de 2 brazos (ver figura 3.18), en general la cantidad de brazos está asociada al área de la sección a perforar.

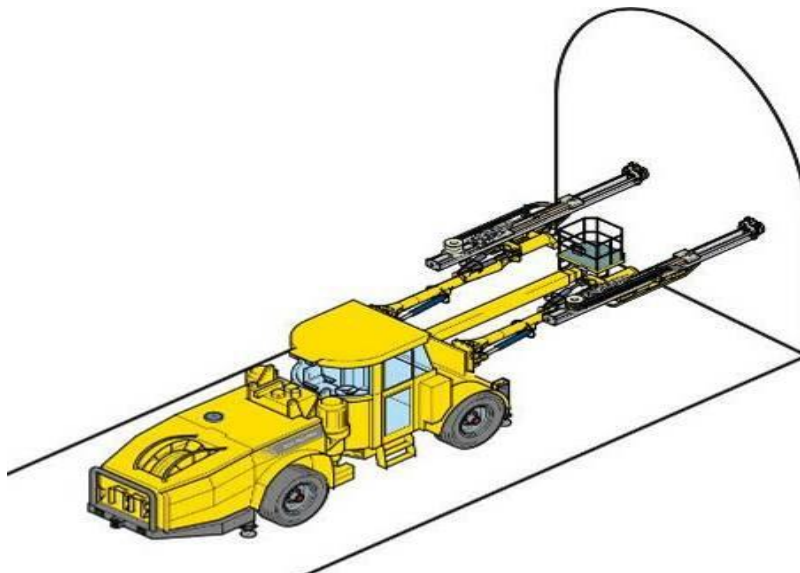


Figura 3.18 - Jumbo de 2 brazos, fuente: Atlas Copco.

ii) *Método RMD:* El método sugiere la utilización de Jumbos de 3 brazos computarizados (ver figura 3.19), basándonos en que el tiempo de perforación total está en función del número de brazos; pasar de 2 brazos a 3 brazos (ver figura 3.20) es aumentar automáticamente el rendimiento un tercio. A esa considerable mejora de rendimiento hay que sumarle una de las bases del método, que es aumentar el largo de perforación de los tradicionales 3,8 a 5,4 [m].

Al utilizar jumbos computarizados aumenta considerablemente la precisión de las perforaciones lo que conlleva a una reducción en la sobre excavación, que en algunos casos podría reducirse de un 30% a 15%.



Figura 3.19 - Pantalla de jumbo con diagrama de disparo, fuente: Atlas Copco.



Figura 3.20 - Jumbo de 3 brazos, fuente: Atlas Copco.

La tendencia demostrada en Australia es hacia los tiros largos cercanos a los 6 [m] con fuentes fijas y perforadoras de alta velocidad (En Cadia East, la plataforma de perforación estaba equipada con Atlas Copco COP 3038, que tenía un 50 % más alta tasa de penetración que su predecesor (COP 1838).

Sistemas avanzados de control, manejo de plan de perforación, la precisión de perforación, software de patrón de diseño y sistemas integrados de navegación laser. Son

mejoras que facilitan el posicionamiento exacto del agujero, lo cual conduce a una mejor productividad, seguridad y lograr un perfil de calidad en la excavación.

Como ejemplo la sobreexcavación típica lograda hoy en Australia es de alrededor de 30 [cm] en un perímetro de 6 [m]. Mediante la utilización de una perforadora de última tecnología se puede reducir fácilmente la sobreexcavación por lo menos a 15 [cm] en el mismo perímetro. Esto significa que la reducción del volumen de material removido por una longitud de 1500 [m] es equivalente al desarrollo de 112 [m] lineales de túnel. Lo que significa más del 6% de ahorro en material eliminado. Esto representa una gran cantidad de tiempo y dinero que se desperdicia en la actualidad con las técnicas tradicionales.

Para un ciclo exitoso que tiene una longitud de avance constante, los barrenos están obligados a ser perforados con una variación mínima en la frente de diseño. El perforador debe conocer la posición de los brazos y alimentar a los carriles para garantizar una dirección al agujero correcta. Esto es especialmente importante al momento de perforar tiros largos de manera que las intersecciones de agujeros y el cabezazo se reducen al mínimo. Lo anterior se complementa con la utilización de un software anticollisión en la computadora del jumbo, lo que mantiene los carriles de alimentación a una separación predeterminada.

4. Retiro equipo de perforación:

El tiempo de retiro es idéntico para ambos métodos.

5. Instalación equipo de carguío:

El tiempo de instalación es idéntico para ambos métodos.

6. Carguío de la frente:

El tiempo de carguío de la frente es similar en ambos métodos, aún cuando el método tradicional utiliza ANFO a granel como explosivo, y el método RMD utiliza Emulsión Mini Dyno Nobel SSE, en el tiempo carguío de ambos no se presentan mayores diferencias.

7. Retiro equipo de carguío:

El tiempo de retiro es idéntico para ambos métodos.

8. Quemada:

El tiempo empleado en esta actividad está fuertemente influenciado por interferencias en el ciclo (coordinación y aislación de la zona). Para ambos métodos esta actividad es similar dado que son condiciones externas al ciclo propiamente tal, que dentro de la filosofía del método RMD se podrían mejorar en función de una correcta programación basada en la reducción de actividades que no generan valor, como es el caso de esta.

Se considera el uso de la emulsión en ANFO, debido a la significativa reducción de los gases nocivos producidos. Sin mencionar que la emulsión no se ve afectada por agujeros de barreno mojados.

Las capacidades de carga que utilizan sistemas de mangueras de retracción también permiten cargar la frente y el perímetro con un solo producto. Esto elimina la dependencia de los productos envasados y el tiempo asociado manipulación y los costos.

## 9. Ventilación y chequeo de gases:

i) *Método Tradicional:* Este método utiliza como explosivo el ANFO, el cual por su nivel de  $\text{CO}_2$  es muy lento en desvanecerse por lo cual su tiempo es relevante frente al uso de otros explosivos. De acuerdo a estudios de índole medio ambiental y seguridad, el tiempo promedio de ventilación es de 30 [min].

ii) *Método RMD:* Este método sugiere la utilización de emulsión como explosivo, la que producto de su naturaleza requiere menos tiempo de ventilación reduciendo a un 50% del uso de ANFO. De acuerdo a estudios de índole medio ambiental y seguridad, el tiempo se reduce a la mitad.

Las concentraciones máximas que se midieron en el aire de retorno de 300 [m] de la frente a disminución de emisiones de CO,  $\text{NO}_2$  y NO fueron 490 [ppm], 24 [ppm], 76 [ppm] y 324 [ppm], 0,5 [ppm], 27 [ppm] para ANFO y emulsión respectivamente. Los niveles de monóxido de carbono cayeron por debajo de 30 [ppm] en 25 [min] con ANFO pero sólo tomó 15 [min] con emulsión (ver figuras 3.21, 3.22 y 3.23):

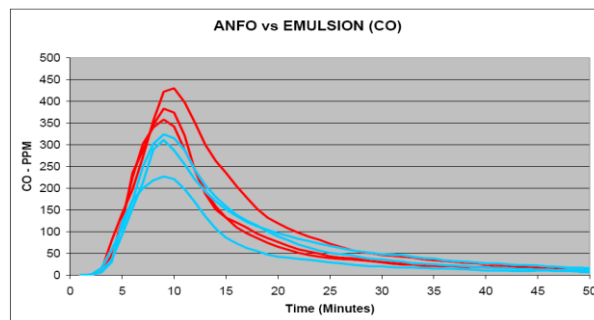


Figura 3.21 - Gráfico CO Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project.

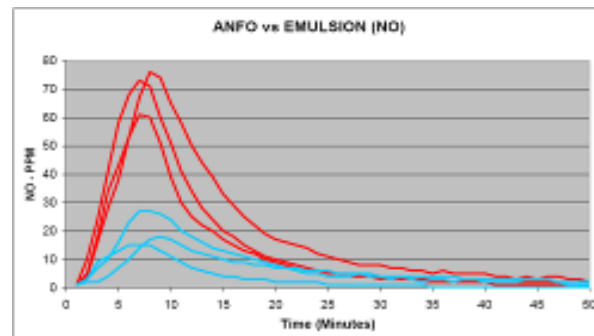


Figura 3.22 - Gráfico NO Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project.

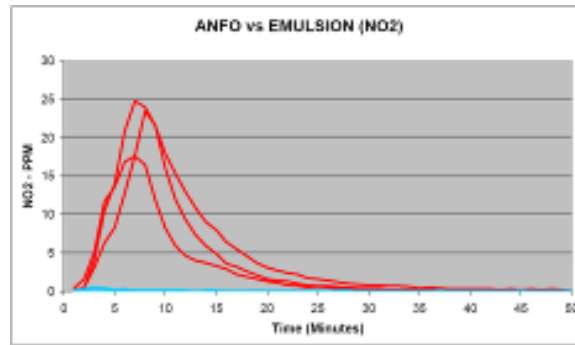


Figura 3.23 - Gráfico NO<sub>2</sub> Anfo v/s Emulsión, fuente: Cadia East Project.

10. Regado de marina y drenaje:

Actividad idéntica en ambos métodos, son consideradas actividades que no generan valor pero son fundamentales del punto de vista de seguridad.

11. Retiro de marina:

El retiro y traslado de marina hasta el punto de acopio de acuerdo al proyecto es de 1200 [m] desde el comienzo del túnel. Dentro de esta actividad se concentra el núcleo de este trabajo, ya que están involucrados dos equipos clave como los son los dumper y los scoop, ambos equipos críticos desde el punto de vista de la producción.

-El scoop debe ser capaz de cargar con suficiente rapidez grandes cantidades de marina al dumper el cual debe trasladarla a los puntos de acopio destinados.

-La selección correcta de ambos equipos requiere un estudio profundo, no sólo del punto de vista económico ya que son equipos que pueden fácilmente llegar a ser el 30% del costo directo del proyecto, sino que también del punto de vista técnico. Es decir, detalles tan básicos como chequear que sea viable su acceso y maniobrabilidad dentro del túnel, como también sus capacidades y velocidades.

-Dentro de este ámbito es clave hacer un estudio del volumen a remover por ciclo, considerando el factor de esponjamiento del material, la capacidad de carga de ambos equipos, tanto como sus velocidades cargados o descargados además de los factores geométricos propios del túnel tales como sería la pendiente y radio de giro en las curvas o rampas de acceso.

i) *Método Tradicional:* El método tradicional sugiere la utilización de los siguientes equipos claves ilustrados en las figuras 3.24 y 3.25:

Scoop Caterpillar R-1600G:



Figura 3.24 - Fotografía Scoop R-1600G, fuente: Caterpillar.

Tolva Mercedes Benz 3644:



Figura 3.25 - Fotografía Tolva 3644, fuente: Kauffman.

ii) *Método RMD*: El método RMD sugiere la utilización de equipos de gran capacidad y velocidad, ya que dentro del ciclo la mayor cantidad de tiempo utilizado es en esta actividad. Por lo cual reducir estos tiempos en forma considerable conlleva Al aumento de la productividad final del ciclo. Dichos equipos se ilustran en las figuras 3.26 y 3.27:

Scoop Sandvik Toro 0011:



Figura 3.26 - Fotografía Scoop Toro 0011, fuente: Sandvik.

Dumper Atlas Copco MT 5010:



Figura 3.27 - Fotografía Dumper MT 5010, fuente: Atlas Copco.

Para seleccionar los equipos adecuados se hará un estudio en detalle en el cual se simularán distintas combinaciones de equipos. En una primera etapa se confeccionará una base de datos con las variables críticas que serán datos de entrada para el modelo de simulación. Estos datos abarcan la capacidad disponible y velocidad promedio, entre otras.

Hay que considerar que la aplicación del método requiere la existencia de grandes secciones para dar cabida a los equipos.

## 12. Acuñadura:

i) *Método Tradicional:* En el método tradicional se sigue utilizando la acuñadura manual, reemplazada a veces por acuñadura mecanizada realizada con un pequeño jumbo de servicios.

ii) *Método RMD:* En el método RMD, se da paso a una nueva tecnología, el hidrosaling (figura 3.28), que no es más que la utilización de agua a presión como forma de acuñadura reduciendo considerablemente los tiempos de instalación y retiro del jumbo sólo para acuñar, además de los beneficios adicionales del agua a presión que ayuda a mejorar la adherencia del shotcrete a las paredes del túnel.

Además se utilizan scaling mecanizados (figura 3.29) cuando la potencia del hidrosaling no es suficiente para acuñar totalmente la zona.

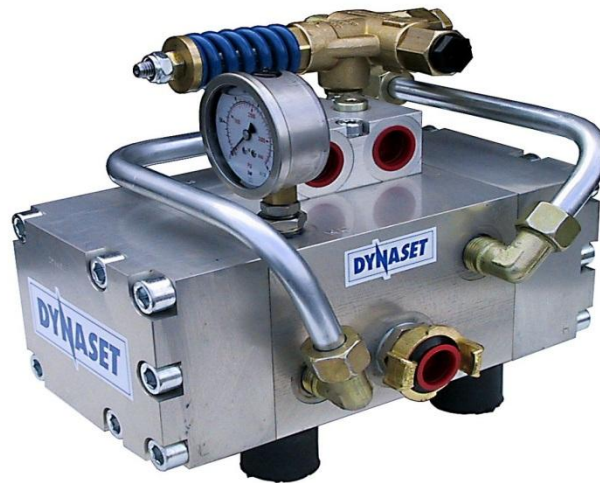


Figura 3.28 - Fotografía Hidroscaling, fuente: Atlas Copco.



Figura 3.29 - Fotografía Scaling mecanizado, fuente: Atlas Copco.

13. Marcación orificios:  
Idéntico a la actividad n°1.
14. Instalación equipo perforación:  
Idéntico a la actividad n°2.
15. Perforación de orificios:  
Idéntico a la actividad n°3.
16. Colocación de pernos:
  - i) *Método Tradicional:* En el método tradicional se sigue utilizando la fortificación común en este caso la utilización de pernos de 2,4 [m] de longitud con lechada.

ii) *Método RMD*: En el método RMD, se utiliza en vez de pernos con resina lo que aumenta la capacidad de soporte del perno en menor tiempo.

A continuación en la figura 3.30 se muestra un esquema de la colocación de pernos, en la cual se aprecia su distribución.

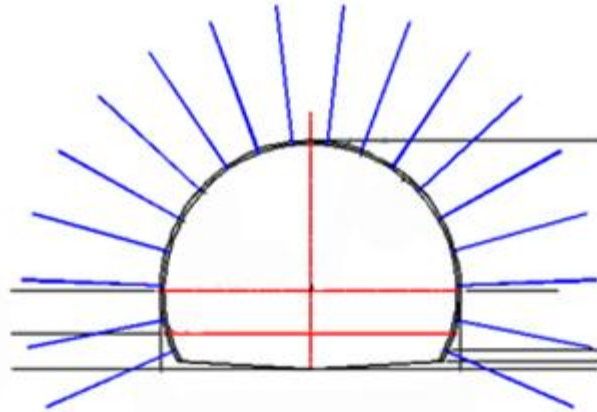


Figura 3.30 - Esquema de colocación de pernos, fuente: Codelco.

17. Retiro equipo de carguío:

El tiempo de retiro es idéntico para ambos métodos.

18. Colocación de malla:

El tiempo de retiro es idéntico para ambos métodos.

19. Colocación de shotcrete:

i) *Método Tradicional*: El método tradicional utiliza shotcrete común en espesor de capa de 10 (cm).

ii) *Método RMD*: El método RMD, en lugar de shotcrete común utiliza shotcrete con fibra el cual en mezcla con algunos aditivos químicos genera una mayor capacidad de soporte.

### 3.4 Modelo de construcción del túnel

#### 3.4.1 Descripción del modelo a simular

El sistema a simular es la construcción de un túnel, el objetivo es construir un modelo de simulación cerrado que lo represente fielmente en el cual se pueda experimentar con las distintas variables construidas. Actualmente la metodología tradicional ofrece bajas tasas de productividad medidas utilizando el parámetro más común que es el indicador metros lineales de avance por mes. Se pretende hacer experimentos en el modelo construido para incorporar prácticas utilizadas por el método RMD a fin de demostrar la hipótesis de investigación que señala que con el método RMD se logran mejores tasas de avance mensual a un costo unitario de equipos menor.

#### 3.4.2 Descripción del modelo conceptual

Para materializar el punto anterior es necesario desarrollar un modelo conceptual el que incorpore la lógica del proceso incluyendo los supuestos de la simulación.

En la figura 3.31 se presenta el esquema lógico de simulación:

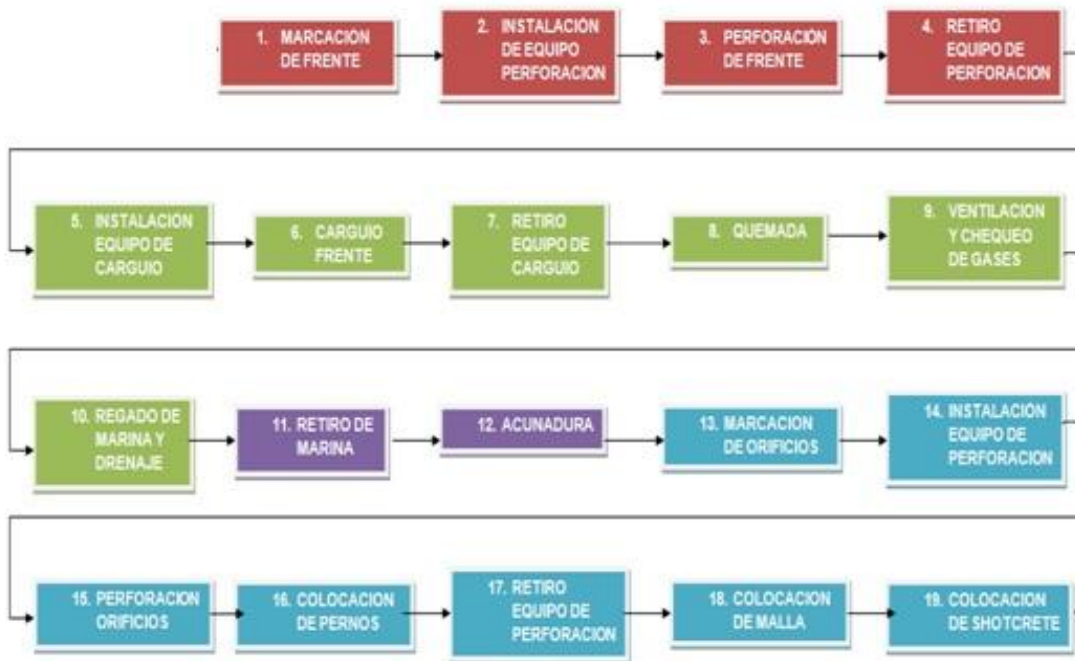


Figura 3.31 - Modelo conceptual del túnel, fuente: elaboración propia.

A continuación se detallan los supuestos de la simulación:

- a) Duración turnos: se supuso una duración de turnos de trabajo de 12 [hrs]; un turno de día y uno de noche, equivalente a un trabajo continuado de 24 [hrs] por día. Esto es

válido desde la siguiente perspectiva; los trabajadores necesitan ir a colación, entrada de turno, etc., sin embargo, la continuidad operacional actual coordina de tal forma las horas de colación y entradas de turno se traslapan logrando que en ningún momento se deja de producir. Esto favorece considerablemente el avance constructivo.

- b) Duración simulación: para poder lograr obtener indicadores de desempeño acordes al control de este tipo de proyectos se asignó una duración de 30 [días], equivalente a un mes promedio. Esto es porque generalmente las unidades de dichos indicadores son metros lineales mensuales, costo equipos mensuales, etc.
- c) Velocidad equipos: dado que modelar el comportamiento real de los equipos en movimiento es una tarea casi imposible, ya que influyen innumerables variables como par de torsión, resistencia a la rodadura, pendientes del terreno, potencia del motor, e incluso factores humanos como cansancio, motivación, etc. se simplificó dicho cálculo utilizando el promedio de las velocidades nominales de las distintas marchas entregados por los fabricantes a través de los respectivos catalogos.
- d) Para el modelado los scoop y dumper se utilizó la capacidad volumétrica por sobre la capacidad de carga, ya que la densidad promedio del material es de 1,6 [ton/m<sup>3</sup>], por lo tanto predomina la capacidad volumétrica a la hora de utilizar en forma más eficiente estos equipos. Además en estos equipos se les consideró dentro del factor de eficiencia la disponibilidad mecánica.

En la tabla 3.1 se muestran las 56 variables utilizadas para el desarrollo del modelo con sus valores iniciales (proyecto real con metodología tradicional):

N°	VARIABLE	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCION
1	LARGO	3,8	m	Largo nominal disparo
2	ANCHO	8,5	m	Ancho nominal sección
3	ALTO	6,47	m	Alto nominal sección
4	RADIO	4,25	m	Radio nominal sección
5	BOTADA	0,9	adim	Botada disparo 90%
6	PI	3,1416	adim	Constante "pi"
7	PERLECH	0,5	adim	Pérdida lechada 50%
8	LONPERN	4	m	Longitud pernos
9	DIAPERN	22	mm	Diámetro de pernos
10	DIAPERF	38	mm	Diámetro de perforación pernos
11	NUMPERN	18	uni	Número de pernos
12	TFCOLPERN	2,68	min	Tiempos fijos colocación pernos
13	VELLECH	12	lt/min	Velocidad de lechadora

14	LONPLANC	0,1	m	Longitud libre planchuela
15	POTJUMB	18	kw	Potencia perforadora
16	DIATIRO	45	mm	Diámetro de tiros disparo
17	FACTORK	1	adim	Factor Roca: 1,0 competente, 1,2 medianamente competente, 1,3 incompetente
18	NUMTIRO	127	uni	Número de tiros disparo
19	NUMHUEC	2	uni	Número de huecos
20	EFIBRA1	1	adim	Eficiencia brazo n°1
21	EFIBRA2	0,75	adim	Eficiencia brazo n°2
22	EFIBRA3	0,65	adim	Eficiencia brazo n°3
23	BRAJUM1	1	adim	Brazo N°1 (1=si,0=no)
24	BRAJUM2	1	adim	Brazo N°1 (1=si,0=no)
25	BRAJUM3	0	adim	Brazo N°1 (1=si,0=no)
26	NUMSPLIT	35	uni	Número de split set
27	LARSPLIT	2,4	m	Longitud de split set
28	TIEMPMAR	10	seg	Tiempo marcación por tiro
29	RECHSHOT	0,875	adim	Rechazo shotcrete 87,5%
30	ESPCAPA	0,1	m	Espesor capa de shotcrete
31	TFCOLSHOT	20	minutos	Tiempos fijos colocación shotcrete
32	RENDSHOT	10	m <sup>3</sup> /hr	Rendimiento shotcretera
33	DISTPERN	1	m	Distancia entre pernos
34	ANCHMALL	2,6	m	Ancho nominal malla fortificación
35	PERDTRAS	0,3	m	Pérdida de malla por traslape
36	ESPONJMAT	1,6	adim	Esponjamiento marina
37	SOBREEXC	0,1	m	Sobreexcavación perimetral
38	CAPBALD	7	yd <sup>3</sup>	Capacidad volumétrica balde scoop
39	EFIBALD	0,95	adim	Eficiencia llenado balde scoop
40	DISTOLV	20	m	Distancia a tolva dumper
41	VELPROMS	7	km/hr	Velocidad promedio scoop
42	CAPTOLV	12	m <sup>3</sup>	Capacidad volumétrica tolva dumper
43	EFITOLV	0,95	adim	Eficiencia llenado tolva scoop
44	DISTACOP	1200	m	Distancia hacia acopio de botado
45	VELPROMD	10	km/hr	Velocidad promedio dumper
46	NDEDUMPER	2	uni	N° de dumper
47	TVENTILA	30	min	Tiempo de ventilación
48	COSPOJUM	26500	US\$/mes	Costo posesión mensual jumbo
49	COSPODUM	12000	US\$/mes	Costo posesión mensual dumper
50	COSPOSCO	16000	US\$/mes	Costo posesión mensual scoop
51	TFCOLMALL	9	min	Tiempos fijos colocación malla
52	TFIJD	6	min	Tiempos fijos dumper
53	TFIJS	0,75	min	Tiempos fijos scoop
54	COSOPEJUM	1,95	(US\$/mpf)	Costo operación jumbo
55	COSOPEDUM	13,54	(US\$/hr)	Costo operación dumper
56	COSOPESCO	16,89	(US\$/hr)	Costo operación scoop

Tabla 3.1 - Variables utilizadas en el modelo, fuente: elaboración propia.

Una vez definidas las variables es posible construir los modelos matemáticos que representaran la duración de las actividades que utilizan dichas variables:

a) Cálculo Área

Para el cálculo del área de la sección a excavar se utiliza las siguientes variables:

*Variables:*

-b: ancho [m]

-h: alto [m]

-r: radio [m]

*Ecuación:*

$$f: a(h - r) + \frac{r^2}{2} \left[ \pi - 2 \arccos \left( \frac{b}{2 \times r} \right) \right] + \frac{r \times b}{2} \sin \left[ \arccos \left( \frac{b}{2 \times r} \right) \right] \langle m^2 \rangle$$

(Ecuación 3.1)

b) Cálculo Perímetro

Para el cálculo del perímetro de la sección a excavar se utiliza las siguientes variables:

*Variables:*

-b: ancho [m]

-h: alto [m]

-r: radio [m]

*Ecuación:*

$$f: 2(h - r) + 2 \times r \times \sin \left[ \arccos \left( \frac{b}{2 \times r} \right) \right] + r \left[ \pi - 2 \times \arccos \left( \frac{b}{2 \times r} \right) \right] \langle m \rangle$$

(Ecuación 3.2)

c) Colocación de Malla

En la colocación de malla influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

-lar: largo [m]

-per: perímetro [m]

-bot: botada [adimensional]

-cantpern: cantidad de pernos [unidad]

- distpern: distancia entre pernos [m]
- anchmall: ancho rollo malla [m]
- pertras: pérdida por traslape [m]
- tfcolmall: tiempos fijos colocación malla [min/ml]

*Ecuación:*

$$f: \text{lar} \times \text{bot} \left[ \left( \frac{0,75 * \text{cantpern}}{\text{distpern}} + \frac{\text{per} \times \text{anchmall}}{(\text{anchmall} - \text{pertras})} \right) + \text{tfcolmall} \right] \langle \text{min} \rangle$$

(Ecuación 3.3)

*Observación:*

Los tiempos fijos colocación malla corresponden al acarreo de la malla más instalación en postura y fijación al túnel.

d) Retiro de Marina

En el retiro de marina influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

- lar: largo [m]
- ar: área [m<sup>2</sup>]
- secx: sobre excavación [adimensional]
- bot: botada [adimensional]
- esp: esponjamiento [adimensional]
- caps: capacidad balde scoop [yd<sup>3</sup>]
- efis: eficiencia llenado balde scoop [adimensional]
- dist: distancia a tolva [m]
- tfijs: tiempos fijos scoop [min]
- vels: velocidad promedio scoop [km/hr]
- capd: capacidad tolva dumper [m<sup>3</sup>]
- efid: eficiencia llenado tolva dumper [adimensional]
- disa: distancia a acopio [m]
- tfijd: tiempos fijos dumper [min]

-veld: velocidad promedio dumper [km/hr]

-ndum: número de dumper [adimensional]

*Auxiliar:*

$$f_{sexc}: 1 + \left( sexc \times \frac{per}{ar} \right) \text{ (adimensional)}$$

*Ecuación:*

$$f: \frac{\frac{lar \times ar \times f_{sexc} \times bot \times esp}{efid \times capd} \left[ \frac{tfijd + \frac{2 \times disa}{16,667 \times veld}}{+ \left( tfijs + \frac{2 \times dist}{16,667 \times vels} \right) \frac{capd}{0,7646 \times caps}} \right]}{ndum} \text{ (min)}$$

(Ecuación 3.4)

*Observaciones:*

-Los tiempos fijos de dumper corresponden a tiempo de carga más tiempo de descarga más tiempo de movimientos.

-Los tiempos fijos de scoop corresponden a tiempo de carga más tiempo de descarga más tiempo de movimientos.

e) Colocación de Shotcrete

En la colocación de shotcrete influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

-lar: largo [m]

-bot: botada [adimensional]

-per: perímetro [m]

-rech: rechazo [adimensional]

-ep: espesor capa: [m]

-rshot: rendimiento shotcretera [m<sup>3</sup>/hr]

-tfcsh: tiempos fijos colocación shotcrete [min]

*Ecuación:*

$$f: \frac{\text{per} \times \text{ep} \times (1 + \text{rech}) \times \text{lar} \times \text{bot}}{\left(\frac{\text{rshot}}{60}\right)} + \text{tfcsh} \langle \text{min} \rangle$$

(Ecuación 3.5)

*Observación:*

Tiempos fijos colocación de shotcrete corresponden a traslado de equipo y fraguado inicial.

f) Marcación de la frente

En la marcación de la frente influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

-ntir: números de tiros [unidad]

-nhue: número de huecos [unidad]

-tmt: tiempo marcación por tiro [seg]

*Ecuación:*

$$f: \frac{(\text{ntir} + \text{nhue}) \times \text{tmt}}{60} \langle \text{min} \rangle$$

(Ecuación 3.6)

g) Marcación orificios

En la marcación de orificios influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

-nori: números de orificios [unidad]

-tmar: tiempo marcación por orificio [seg]

*Ecuación:*

$$f: \frac{\text{nori} \times \text{tmar}}{60} \langle \text{min} \rangle$$

(Ecuación 3.7)

h) Colocación de Pernos

En la colocación de pernos influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

- npern: números de pernos [unidad]
- perl: pérdida lechada/resina [adimensional]
- lope: longitud perno [m]
- dpern: diámetro de pernos [mm]
- dperf: diámetro de perforación [mm]
- bot: botada [adimensional]
- vlech: velocidad lechadora [lt/min]
- lpla: longitud libre para planchuela [m]
- tfcp: tiempos fijos colocación pernos [min]

*Auxiliar:*

$$aa: \frac{\pi}{4} \times \frac{(dperf^2 - dpern^2)}{100}$$

$$vollec: \frac{aa}{10} \times (lope - lpla) \times (1 + perl)$$

*Ecuación:*

$$f: lar \times npern \times \left( \frac{vollec}{vlech} + tfcp \right) \text{ (min)}$$

(Ecuación 3.8)

*Observación:*

Tiempos fijos de colocación de pernos incluye traslado de pernos a postura, fijación y endurecimiento parcial.

## i) Perforación Frente

En la perforación de la frente influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

- lar: largo [metros]
- an: ancho [metros]
- ntir: n° de tiros [unidades]

- nhue: n° de huecos [unidades]
- pot: potencia [kw]
- dperf: diámetro de perforación [mm]
- fk: factor K= 1,0 roca competente; 1,2 roca medianamente competente; 1,3 roca incompetente
- bj1: brazo N°1: SI=1, NO=0
- bj2: brazo N°2: SI=1, NO=0
- bj3: brazo N°3: SI=1, NO=0
- ej1: eficiencia brazo N°1 [adimensional]
- ej2: eficiencia brazo N°2 [adimensional]
- ej3: eficiencia brazo N°3 [adimensional]
- nsps: número Split Set [unidad]
- lsps: largo Split Set [m]

*Auxiliar:*

$$v_{\text{perf}}: \frac{31 \times f_k \times \text{pot}}{d_{\text{perf}}^{1,4}}$$

$$e_{\text{fju}}: b_{j1} \times e_{j1} + b_{j2} \times e_{j2} + b_{j3} \times e_{j3}$$

$$s_{\text{ps}}: \frac{n_{\text{sps}} \times l_{\text{sps}}}{v_{\text{perf}}} \times 1,5$$

*Ecuación:*

$$f: \frac{(n_{\text{tir}} + n_{\text{hue}})}{(v_{\text{perf}} \times e_{\text{fju}})} \times l_{\text{ar}} + s_{\text{ps}} \text{ (min)}$$

(Ecuación 3.9)

#### j) Perforación orificios

En la perforación de orificios influyen varias variables dentro de las más relevantes están:

*Variables:*

- an: ancho [m]
- npern: n° de pernos [unidad]

-lpern: largo pernos [m]

-pot: potencia [kw]

-dperf: Diámetro de perforación [mm]

-fk: factor K= 1,0 roca competente; 1,2 roca medianamente competente; 1,3 roca incompetente

-bj1: brazo N°1: SI=1, NO=0

-bj2: brazo N°2: SI=1, NO=0

-bj3: brazo N°3: SI=1, NO=0

-ej1: eficiencia brazo N°1 [adimensional]

-ej2: eficiencia brazo N°2 [adimensional]

-ej3: eficiencia brazo N°3 [adimensional]

*Auxiliar:*

$$v_{\text{perf}} = \frac{31 \times f_k \times \text{pot}}{d_{\text{perf}}^{1,4}}$$

$$ef_{\text{ju}} = b_{j1} \times e_{j1} + b_{j2} \times e_{j2} + b_{j3} \times e_{j3}$$

*Ecuación:*

$$f = \frac{(n_{\text{pern}})}{(v_{\text{perf}} \times ef_{\text{ju}})} \times l_{\text{pern}} \text{ (min)}$$

(Ecuación 3.10)

k) Avance mensual

Para el avance mensual se utilizó las siguientes variables:

*Variables:*

-nci: número de ciclos [unidad]

-lar: largo [m]

-bot: botada [adimensional]

*Ecuación:*

$$f = n_{\text{ci}} \times \text{lar} \times \text{bot} \text{ (ml/mes)}$$

(Ecuación 3.11)

## 1) Costo utilización Jumbo

Para el cálculo del costo de utilización jumbo se utilizó las siguientes variables:

*Variables:*

- cpj: costo posesión jumbo [US\$/mes]
- coj: costo operación jumbo [US\$/mpf]
- tfj: tiempos fijos jumbo [min]
- lar: largo [m]
- ntir: número de tiros [unidad]
- nhue: número de huecos [unidad]
- npern: número de pernos [unidad]
- lope: longitud pernos [m]

*Ecuación:*

$$f: cpj + [(ntir + nhue) \times lar + (npern \times lope)] \times coj \text{ (US$/mes)}$$

(Ecuación 3.12)

## m) Costo utilización scoop

Para el cálculo de utilización de scoop se utilizó las siguientes variables:

*Variables:*

- cps: costo posesión scoop [US\$/mes]
- cos: costo operación scoop [US\$/hr]
- tfs: tiempos fijos scoop [min]
- dtolv: distancia tolva [m]
- vels: velocidad promedio scoop [km/hr]
- lar: largo [m]
- ar: área [m<sup>2</sup>]
- fse: factor sobre excavación [adimensional]
- bot: botada [adimensional]
- espm: esponjamiento material [adimensional]

- efd: eficiencia tolva dumper [adimensional]
- cdum: capacidad tolva dumper [m<sup>3</sup>]
- cscs: capacidad balde scoop [yd<sup>3</sup>]

*Auxiliar:*

$$fse: 1 + \left( sexc \times \frac{per}{ar} \right) \text{ (adimensional)}$$

$$vdup: \frac{lar \times ar \times fse \times bot \times espm}{efd \times cdum}$$

$$npal: \frac{cdum}{0,7646 \times cscs} \times vdup$$

*Ecuación:*

$$f: cps + \cos \frac{\left( tfs + \frac{2 \times dtolv}{16,667 \times vels} \right) \times npal}{60} \text{ (US$/mes)}$$

(Ecuación 3.13)

n) Costo utilización dumper

Para el cálculo de utilización del dumper se utilizó las siguientes variables:

*Variables:*

- cpd: costo posesión dumper [US\$/mes]
- cod: costo operación dumper [US\$/hr]
- tfd: tiempos fijos dumper [min]
- vdum: velocidad promedio dumper [km/hr]
- lar: largo [m]
- ar: Área [m<sup>2</sup>]
- fse: factor sobre excavación [adimensional]
- bot: botada [adimensional]
- espm: esponjamiento material [adimensional]
- efd: eficiencia tolva dumper [adimensional]
- cdum: capacidad tolva dumper [m<sup>3</sup>]
- daco: Distancia acopio [m]

*Auxiliar:*

$$\text{fse: } 1 + \left( \text{sexc} \times \frac{\text{per}}{\text{ar}} \right) \langle \text{adimensional} \rangle$$

$$\text{vdup: } \frac{\text{lar} \times \text{ar} \times \text{fse} \times \text{bot} \times \text{espm}}{\text{efd} \times \text{cdum}}$$

*Ecuación:*

$$\text{f: cpd} + \text{cod} \frac{\left( \text{tfd} + \frac{2 \times \text{daco}}{16,667 \times \text{vdum}} \right) \times \text{vdup}}{60} \langle \text{US\$/mes} \rangle$$

(Ecuación 3.14)

o) Costo total equipos

*Ecuación:*

$$\text{f: costo jumbo} + \text{costo scoop} + \text{costo dumper} \langle \text{US\$/mes} \rangle$$

(Ecuación 3.15)

p) Costo unitario

*Ecuación:*

$$\text{f: } \frac{\text{costo total}}{\text{avance mensual}} \langle \text{US\$/ml} \rangle$$

(Ecuación 3.16)

### 3.4.3 Recolección de datos

Para poder “alimentar” el modelo con información, se realiza un estudio de tiempos, que consiste básicamente en controlar las duraciones de las 19 actividades que componen en ciclo constructivo. Este estudio se realiza por un periodo de cuatro meses (febrero, marzo, abril, mayo 2012), lo que equivale a 120 datos por actividad.

El objetivo es poder asignarle a las 19 actividades una distribución de probabilidad, mediante la construcción de una distribución de frecuencias o histograma y escoger la mejor distribución. Dicha distribución es clave para ingresarla a las distintas actividades del modelo de simulación.

El software ARENA cuenta además con una potente herramienta llamada “Input Analyzer”, la cual es capaz de ajustar datos a una distribución determinada, además de evaluar la bondad de ajustes de dicha distribución escogida en base a dos criterios:

1.- Menor error cuadrático

2.- P-valor mayor que el nivel de significancia escogido, en este caso, un 5%.

Para el criterio N°2 el software realiza 2 pruebas de ajuste de bondad, la primera es la Chi cuadrado, y la segunda es la prueba de Kolmogorov-Smirnov (ambas ver en ANEXO 4). Cabe destacar que si el P-valor es menor o igual que el nivel de significancia se rechaza la hipótesis nula.

### **Prueba de Hipótesis**

$H_0$ : Duración Actividad X sigue un distribución Y.

En este caso particular, la distribución Y corresponde a una distribución de tipo triangular, la que es la distribución óptima para un modelo en base a actividades o procesos, ya que simula de mejor manera la realidad de estos.

El funcionamiento del “Input Analyzer” es bastante sencillo y se detalla en ANEXO 5. Dado que se está trabajando con más de 2000 datos sería poco eficiente realizar el cálculo en forma manual, por lo cual esta herramienta es una ayuda necesaria. Sin embargo, hay que tener los conocimientos suficientes para poder interpretar los resultados y concluir correctamente, para lo cual se detalla el análisis de dos actividades a modo de ejemplo:

*Actividad: Quemada*

A continuación se presenta en la tabla 3.2 los valores obtenidos en terreno:

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	190	41	12/03/2012	175	81	21/04/2012	155
2	02/02/2012	220	42	13/03/2012	110	82	22/04/2012	180
3	03/02/2012	200	43	14/03/2012	270	83	23/04/2012	240
4	04/02/2012	255	44	15/03/2012	175	84	24/04/2012	145
5	05/02/2012	145	45	16/03/2012	160	85	25/04/2012	190
6	06/02/2012	195	46	17/03/2012	170	86	26/04/2012	150
7	07/02/2012	195	47	18/03/2012	85	87	27/04/2012	195
8	08/02/2012	245	48	19/03/2012	140	88	28/04/2012	145
9	09/02/2012	225	49	20/03/2012	90	89	29/04/2012	105
10	10/02/2012	155	50	21/03/2012	235	90	30/04/2012	235
11	11/02/2012	135	51	22/03/2012	145	91	01/05/2012	90
12	12/02/2012	95	52	23/03/2012	135	92	02/05/2012	105
13	13/02/2012	170	53	24/03/2012	160	93	03/05/2012	155
14	14/02/2012	140	54	25/03/2012	180	94	04/05/2012	230
15	15/02/2012	215	55	26/03/2012	140	95	05/05/2012	165
16	16/02/2012	135	56	27/03/2012	210	96	06/05/2012	130
17	17/02/2012	230	57	28/03/2012	200	97	07/05/2012	95
18	18/02/2012	175	58	29/03/2012	130	98	08/05/2012	175
19	19/02/2012	220	59	30/03/2012	190	99	09/05/2012	135
20	20/02/2012	205	60	31/03/2012	145	100	10/05/2012	160
21	21/02/2012	240	61	01/04/2012	155	101	11/05/2012	190
22	22/02/2012	150	62	02/04/2012	225	102	12/05/2012	195
23	23/02/2012	250	63	03/04/2012	150	103	13/05/2012	180
24	24/02/2012	160	64	04/04/2012	160	104	14/05/2012	230
25	25/02/2012	170	65	05/04/2012	155	105	15/05/2012	190
26	26/02/2012	190	66	06/04/2012	260	106	16/05/2012	205
27	27/02/2012	105	67	07/04/2012	170	107	17/05/2012	95
28	28/02/2012	105	68	08/04/2012	155	108	18/05/2012	130
29	29/02/2012	180	69	09/04/2012	195	109	19/05/2012	175
30	01/03/2012	200	70	10/04/2012	180	110	20/05/2012	130
31	02/03/2012	150	71	11/04/2012	215	111	21/05/2012	175
32	03/03/2012	145	72	12/04/2012	195	112	22/05/2012	265
33	04/03/2012	170	73	13/04/2012	245	113	23/05/2012	215
34	05/03/2012	145	74	14/04/2012	235	114	24/05/2012	80
35	06/03/2012	130	75	15/04/2012	100	115	25/05/2012	160
36	07/03/2012	205	76	16/04/2012	175	116	26/05/2012	150
37	08/03/2012	160	77	17/04/2012	185	117	27/05/2012	225
38	09/03/2012	185	78	18/04/2012	205	118	28/05/2012	135
39	10/03/2012	120	79	19/04/2012	150	119	29/05/2012	135
40	11/03/2012	165	80	20/04/2012	230	120	30/05/2012	130

Tabla 2.2 - Datos de toma de terreno actividad Quemada, fuente: elaboración propia.

Aquí se observa el histograma de la actividad (figura 3.32) y la línea representa el ajuste de la distribución triangular.



Figura 3.32 - Histograma de datos actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer.

Como primer criterio se analiza cuál distribución presenta el menor error cuadrático, lo que se visualiza en el siguiente reporte en la figura 3.33:

FUNCION	ERROR CUADRADO
Triangular	0,00568
Beta	0,00630
Normal	0,00652
Weibull	0,00683
Gamma	0,01570
Erlang	0,01830
Uniforme	0,02280
Lognormal	0,05040
Exponencial	0,05250

Figura 3.33 - Reporte de error al cuadrado actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer.

Se observa claramente que la distribución triangular es la que presenta el menor error cuadrado con un valor de 0,00568. Al revisar el segundo criterio, que señala que el P-valor sea menor a 0,05; se puede ver que para esta actividad en particular el programa realizó dos pruebas de bondad de ajuste, lo anterior se muestra en el siguiente reporte de la figura 3.34:

RESUMEN DISTRIBUCIÓN	
Distribución:	Triangular
Expresión:	TRIA(80,146,270)
PRUEBA CHI CUADRADO	
Estadístico:	7,09
P-valor:	0,223
PRUEBA KOLMOGOROV-SMIRNOV	
Estadístico:	0,0988
P-valor:	>0,15

Figura 3.34 - Reporte de distribución triangular actividad Quemada, fuente: Software Input Analyzer.

Del reporte se desprende que para el test Chi cuadrado el P-valor es de 0,223 y que para el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0,15; en ambos casos los valores resultaron mayores que el nivel significancia de 0,05. Esto de acuerdo al contraste de hipótesis, señala que no se rechaza la hipótesis nula “la actividad quemada sigue una distribución triangular”.

Se presenta un segundo ejemplo:

*Actividad: Instalación equipo perforación I*

A continuación se presenta en la tabla 3.3 los valores obtenidos en terreno:

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	15	41	12/03/2012	15	81	21/04/2012	15
2	02/02/2012	15	42	13/03/2012	15	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	10	43	14/03/2012	20	83	23/04/2012	20
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	20	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	15	45	16/03/2012	20	85	25/04/2012	20
6	06/02/2012	20	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	10
7	07/02/2012	20	47	18/03/2012	15	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	20	48	19/03/2012	20	88	28/04/2012	15
9	09/02/2012	10	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	20
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	10	91	01/05/2012	15
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	15	92	02/05/2012	10
13	13/02/2012	20	53	24/03/2012	20	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	20	94	04/05/2012	15
15	15/02/2012	15	55	26/03/2012	15	95	05/05/2012	20
16	16/02/2012	15	56	27/03/2012	20	96	06/05/2012	20
17	17/02/2012	20	57	28/03/2012	15	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	20	58	29/03/2012	10	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	20	99	09/05/2012	20
20	20/02/2012	10	60	31/03/2012	20	100	10/05/2012	15
21	21/02/2012	15	61	01/04/2012	20	101	11/05/2012	10
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	15	102	12/05/2012	20
23	23/02/2012	15	63	03/04/2012	20	103	13/05/2012	15
24	24/02/2012	25	64	04/04/2012	20	104	14/05/2012	15
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	15	105	15/05/2012	15
26	26/02/2012	15	66	06/04/2012	10	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	15	67	07/04/2012	15	107	17/05/2012	20
28	28/02/2012	20	68	08/04/2012	15	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	15	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	15
30	01/03/2012	15	70	10/04/2012	15	110	20/05/2012	20
31	02/03/2012	10	71	11/04/2012	20	111	21/05/2012	10
32	03/03/2012	20	72	12/04/2012	15	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	25	73	13/04/2012	15	113	23/05/2012	15
34	05/03/2012	25	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	20
35	06/03/2012	20	75	15/04/2012	15	115	25/05/2012	20
36	07/03/2012	25	76	16/04/2012	20	116	26/05/2012	15
37	08/03/2012	15	77	17/04/2012	15	117	27/05/2012	15
38	09/03/2012	15	78	18/04/2012	15	118	28/05/2012	20
39	10/03/2012	20	79	19/04/2012	20	119	29/05/2012	20
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	10

Tabla 3.3 - Datos de toma de terreno actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: elaboración propia.

Aquí se observa el histograma de la actividad (figura 3.35) y la línea representa el ajuste de la distribución triangular.



Figura 3.35 - Histograma de datos actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: Software Input Analyzer.

Como primer criterio se analiza cuál distribución presenta el menor error cuadrático, lo que se visualiza en el siguiente reporte de la figura 3.36:

FUNCIÓN	ERROR CUADRADO
Triangular	0,30900
Poisson	0,31500
Normal	0,31900
Beta	0,32200
Weibull	0,32200
Gamma	0,33100
Erlang	0,33400
Uniforme	0,33500
Exponencial	0,35100

Figura 3.36 - Reporte de error al cuadrado actividad Instalación equipo de perforación 1, fuente: Software Input Analyzer.

Se observa que la distribución triangular es la que presenta el menor error cuadrado con un valor de 0,309, sin embargo, las otras distribuciones presentan errores muy similares (esto podría indicar que cualquiera de la distribuciones señaladas se puede ajustar en buena forma). Al revisar el segundo criterio, que señala que el P-valor debe ser menor a 0,05; en esta actividad en particular el programa realizó una prueba de bondad de ajuste, lo anterior se muestra en el siguiente reporte de la figura 3.37:

RESUMEN DISTRIBUCIÓN	
Distribución:	Triangular
Expresión:	TRIA(9.5,15,25.5)
PRUEBA CHI CUADRADO	
Estadístico:	269
P-valor:	<0.005

Figura 3.37 - Reporte de distribución triangular actividad Instalación equipo de perforación I, fuente: Software Input Analyzer.

Del reporte se desprende que P-valor del test Chi cuadrado arroja un valor menor a 0,005 lo que rechaza la hipótesis nula: “actividad instalación equipo de perforación sigue una distribución triangular”. Sin embargo, esto es producto de que como todas las distribuciones presentan errores al cuadrado similares, es posible aplicarle a los datos cualquier distribución.

Es importante destacar que un contraste de hipótesis nula no permite aceptar una hipótesis, simplemente la rechaza o no la rechaza, es decir, la cataloga como verosímil o inverosímil.

Dado que para el modelo es ventajoso usar una distribución triangular, se adopta esta en forma arbitraria frente al resto de las distribuciones también compatibles.

Finalmente una vez obtenida la distribución que cumple satisfactoriamente ambos criterios, se exporta al software ARENA donde se introduce como una expresión matemática. Lo anterior se muestra en la tabla 3.4.

N°	ACTIVIDAD	MINIMO (min)	PROBABLE (min)	MAXIMO (min)
1	MARCACION FRENTE	14,5	25,5	45,5
2	INSTALACION EQUIPO PERFORACION 1	9,5	15,0	25,5
3	PERFORACION FRENTE	100,0	154,0	220,0
4	RETIRO EQUIPO PERFORACION 1	9,5	15,4	30,5
5	INSTALACION EQUIPO CARGUIO	9,5	15,0	30,5
6	CARGUIO DE FRENTE	49,5	59,5	70,5
7	RETIRO EQUIPO CARGUIO	9,5	15,0	30,5
8	QUEMADA	80,0	146,0	270,0
9	VENTILACION Y CHEQUEO DE GASES	9,5	20,0	45,5
10	REGADA DE MARINA Y DRENAJE	9,5	15,6	50,5
11	RETIRO DE MARINA	165,0	245,0	310,0
12	ACUÑADURA	14,5	35,0	80,5
13	MARCACION ORIFICIOS	4,5	10,0	15,5
14	INSTALACION EQUIPO PERFORACION 2	9,5	15,0	25,5
15	PERFORACION ORIFICIOS	19,5	30,0	60,5
16	COLOCACION DE PERNOS	140,0	207,0	290,0
17	RETIRO EQUIPO PERFORACION 2	9,5	15,9	30,5
18	COLOCACION DE MALLA	40,0	149,0	225,0
19	COLOCACION DE SHOTCRETE	69,5	96,6	166,0
<b>TOTAL</b>		<b>773,0</b>	<b>1284,5</b>	<b>2022,5</b>

Tabla 3.4 - Resumen distribución triangular de actividades, fuente: elaboración propia.

### 3.4.4 Desarrollo modelo computacional

A continuación se explica cómo se confeccionó el modelo de simulación computacional.

Existen varios supuestos iniciales con los cuales se dió partida al modelo, los que se detallan a continuación:

- a) *El túnel*: Para simular la construcción del túnel se supuso que el túnel era una “entidad”, la cual pasa por distintas estaciones de trabajo donde se va construyendo. Esta forma de trabajo se adapta perfectamente a la realidad de la metodología constructiva. Aunque pueda parecer difícil de imaginárselo, ya que el pensamiento lógico sugiere que los recursos (mano de obra, equipos, materiales) fueran al túnel y no al revés.
- b) *Secuencia constructiva*: La construcción de túneles necesita que se respete una secuencia constructiva en serie, es decir, el avance va en una dirección. No existen actividades que se realiza en forma paralela. Para lograr eso, se desarrollan bloques “procesos” interrelacionados, partiendo por la actividad “marcación de frente” hasta la “colocación de shotcrete”. Terminada la última actividad se repite el ciclo. Para lograr ello, el software utiliza el bloque “mantener”, al cual se le asigna la condición de que

no puede liberar ninguna entidad hasta que la entidad que está en proceso llegue a la salida.

- c) *Nº de ciclos*: Se crea un bloque “grabar” el cual registra el número de ciclo completados en el tiempo de simulación, dato importante a la hora de definir el avance de construcción.
- d) *Tiempo ciclos*: Junto al punto anterior, también es necesario tener un indicador del tiempo de ejecución de un ciclo completo, con el fin de poder validar dichos datos con información de terreno. Para esto se incorporan dos bloques; “asignar” y “grabar”. El primero asigna información de la hora exacta en que entra la entidad al sistema y el segundo registra la hora exacta de salida del sistema; y por consiguiente la diferencia o “delta” de duración del ciclo.

En el modelo existen 56 variables, las cuales pueden ser modificadas en tiempo real y generar infinitas combinaciones o escenarios. Además el modelo contempla la salida de datos referentes a costos totales de equipos críticos (jumbo, scoop, dumper), avance mensual, costo unitario por metro lineal y las duraciones de las actividades que están en función de las variables anteriores. Pero el modelo va más allá, ya que es capaz de entregar mucha más información que la necesaria para cubrir los alcances de este trabajo; como es evaluar rendimientos al cambiar la geometría del túnel, el tipo de roca, el tipo de materiales, etc.

El modelo se desarrolla en forma flexible dado que ante eventuales actualizaciones de información (nuevos equipos, nuevas metodologías, nuevos rendimientos, etc.) el modelo se pueda adaptar a esos cambios sin mayores problemas.

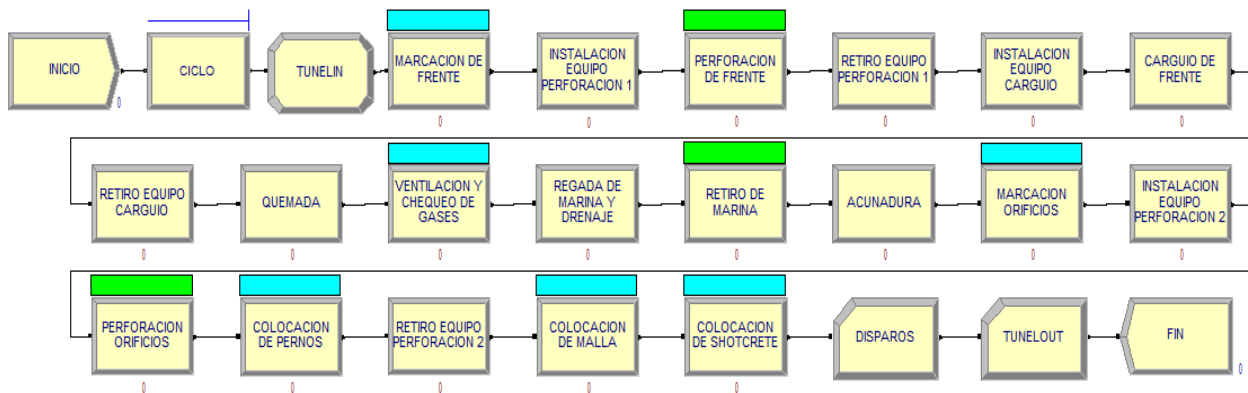


Figura 3.38 - Esquema modelo computacional del túnel, fuente: Software ARENA.

En el esquema anterior (ver figura 3.38) se visualizan actividades marcadas con rectángulos de colores, como una forma de clasificación. Las actividades que no tienen rectángulo, son actividades que son comunes a ambos métodos, y dado que su duración es relativamente repetitiva en el tiempo, se les han asignados distribuciones de duración, las cuales han sido previamente ajustadas a una distribución de tipo triangular dado su comportamiento.

Las actividades con rectángulo color celeste (marcación de la frente, ventilación y chequeo de gases, marcación de orificios, colocación de pernos, colocación de malla, colocación de shotcrete), corresponden a actividades que están en función de las variables del modelo pero que no están directamente vinculadas con los equipos críticos. Por el contrario, las actividades con rectángulo de color verde (perforación de frente, retiro de marina, perforación de orificios), son el centro de interés de este trabajo ya que es allí donde se intervienen activamente tanto el jumbo, en las actividades de perforación, como el scoop y dumper en las actividades de retiro de marina.

A continuación a modo de detalle se exponen los bloques más representativos en el modelo y su configuración:

### 1.- Inicio:

Figura 3.39 - Módulo Create, fuente: Software ARENA.

El bloque “Create” (ver figura 3.39) define la creación de las distintas entidades, en este caso, “Tunel”. Se define el tiempo entre llegada de entidades, máxima cantidades, unidades de tiempo, entre otros parámetros.

### 2.- Ciclo:

Figura 3.40 - Módulo Hold, fuente: Software ARENA.

El bloque “Hold” (ver figura 3.40) mantiene las entidades en una cola para ser liberadas en el momento que se cumpla la condición impuesta “el número de entidades en el sistema debe ser 1”.

### 3.- Tunel in:

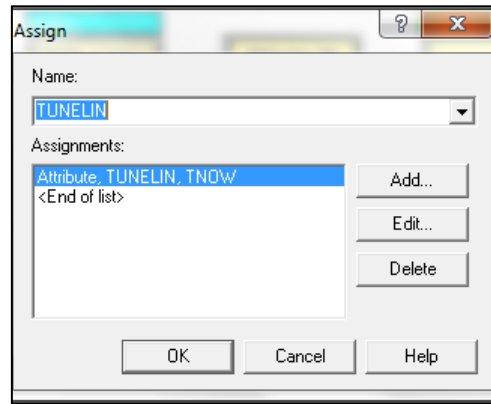


Figura 3.41 - Módulo Assign, fuente: Software ARENA.

El bloque “Assign” (ver figura 3.41) asigna un atributo a la entidad, en este caso le asigna la información de hora de entrada al sistema, expresada por la función interna “TNOW”.

### 4.- Instalación Equipo Perforación 1:

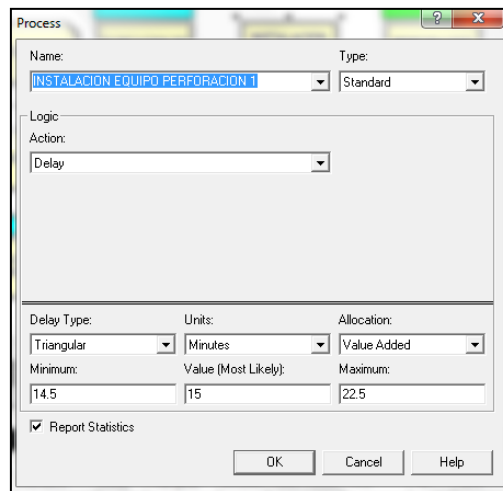


Figura 3.42 - Módulo Process (1), fuente: Software ARENA.

El bloque “Process” (ver figura 3.42) simboliza la actividad a realizar, definiendo que es una actividad que se hace presente en el ciclo a través de una demora que está en función de una distribución de tiempo, son sus parámetros respectivos.

### 5.- Perforación Frente:

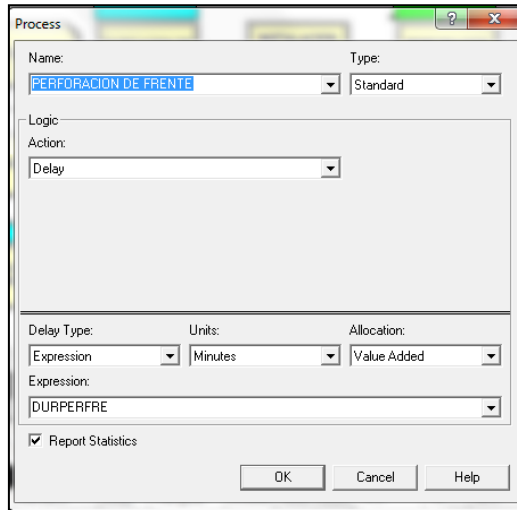


Figura 3.43 - Módulo Process (2), fuente: Software ARENA.

A diferencia del bloque anterior, en este (ver figura 3.43) la demora o tiempo transcurrido está en función de una expresión matemática definida previamente en el programa, la cual es modificable en tiempo real.

### 6.- Disparo

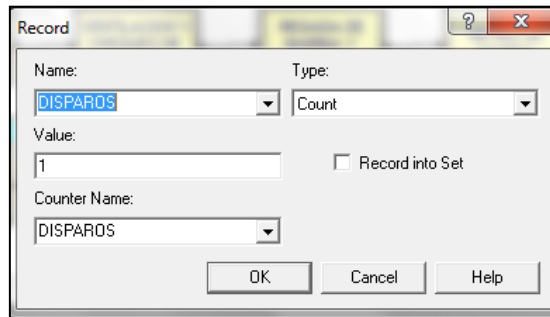


Figura 3.44 - Módulo Record, fuente: Software Arena.

El bloque “Record” (ver figura 3.44) graba información del sistema, en este caso se configuró para que sirva como contador de cuantas entidades han salido del sistema.

## 7.- Fin

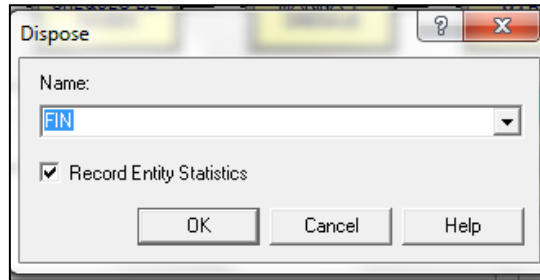


Figura 3.45 - Módulo Dispose, fuente: Software Arena.

El bloque “Dispose” (ver figura 3.45) tiene la función única de eliminar la entidad del sistema, condición clave para que pueda ingresar otra entidad al sistema.

## 8.- Réplicas:

El número de réplicas toma gran importancia a la hora de validar los datos de salida del modelo, ya que se requiere reducir a la mitad del intervalo de confianza esperado. En este modelo se especifica un 95% de confianza, lo que quiere decir que se espera que de la totalidad de datos que reporta el modelo, un 5% pueda estar fuera del rango esperado. Lo anterior es un buen indicador para que los datos sean representativos. El problema radica en definir el número óptimo de réplicas, ya que, mientras más réplicas se realizan, mejor es el ajuste, pero el tiempo de cálculo aumenta considerablemente.

Existe una forma empírica (Law & Kelton) de aproximarse al valor óptimo del número de réplicas  $N$ :

$$N \cong Z_{1-\alpha/2}^2 \frac{S^2}{H^2}$$

(Ecuación 3.17)

En donde:

$N$ : Número de réplicas

$Z$ : Distribución normal estándar

$S$ : Desviación estándar

$H$ : Ancho medio del intervalo de confianza

$\alpha$ : Nivel de significancia

Del modelo de simulación, el cual como primera aproximación se ejecuta con  $N=10$ , se obtiene para el resultado de salida “Tiempo Total Ciclo”, dos parámetros fundamentales:

$$\bar{X} = 1292,86 \text{ min}$$

$$H = 4,26 \text{ min}$$

Para obtener S a partir de estos datos basta con aplicar la siguiente ecuación:

$$S = \frac{H \times \sqrt{N}}{t_{n-1, 1-\alpha/2}}$$

(Ecuación 3.18)

$$t_{n-1, 1-\alpha/2} = 2,2622 \text{ (Ver tabla T Student en Apéndice n°2)}$$

$$H = 4,26$$

$$N = 10$$

Obteniendo el valor para  $S = 5,955$

De la tabla de Distribución Normal Estándar, para un nivel de confianza del 97,5%  $1 - \alpha/2$  se obtiene un  $Z = 1,96$ .

Luego de la ecuación (3.17) se obtiene el valor de  $N = 7,5$ .

Dado que dicho valor de N es menor que el valor inicial ( $N = 10$ ), el intervalo de confianza obtenido resulta ser más certero.

### 3.4.5 Verificación del modelo

En esta etapa se chequea que el modelo computacional siga la secuencia lógica definida, es decir, que la entidad pase por cada una de las actividades en forma secuencial y que no entre otra entidad al sistema hasta que esta haya terminado su ciclo.

Además se chequea en forma manual las expresiones matemáticas que describen las duraciones de las actividades, verificando que todas cumplan satisfactoriamente.

### 3.4.6 Validación del modelo

En esta etapa se determina si el modelo ejecutado arroja resultados acordes a los datos reales, por lo cual se compara los resultados obtenidos por el modelo con los valores probables de las distribuciones triangulares que se ajustó a cada actividad arrojando la siguiente tabla 3.5:

N°	ACTIVIDAD	TERRENO (min)	MODELO (min)
1	MARCACION FRENTE	25,5	21,5
2	INSTALACION EQUIPO PERFORACION 1	15,0	15,0
3	PERFORACION FRENTE	154,0	149,3
4	RETIRO EQUIPO PERFORACION 1	15,4	15,4
5	INSTALACION EQUIPO CARGUIO	15,0	15,0
6	CARGUIO DE FRENTE	59,5	59,5
7	RETIRO EQUIPO CARGUIO	15,0	15,0
8	QUEMADA	146,0	146,0
9	VENTILACION Y CHEQUEO DE GASES	20,0	30,0
10	REGADA DE MARINA Y DRENAJE	15,6	15,6
11	RETIRO DE MARINA	245,0	268,8
12	ACUÑADURA	35,0	35,0
13	MARCACION ORIFICIOS	10,0	3,0
14	INSTALACION EQUIPO PERFORACION 2	15,0	15,0
15	PERFORACION ORIFICIOS	30,0	14,8
16	COLOCACION DE PERNOS	207,0	208,5
17	RETIRO EQUIPO PERFORACION 2	15,9	15,9
18	COLOCACION DE MALLA	149,0	145,7
19	COLOCACION DE SHOTCRETE	96,6	88,5
<b>TOTAL</b>		1284,5	1277,4
<b>ERROR</b>		0,6%	

Tabla 3.5 - Resumen distribución triangular de actividades, fuente: elaboración propia.

Se puede apreciar de la tabla 3.5 que la sumatoria total de ambas series de datos dan valores muy cercanos entre sí, con un error porcentual menor al 3% (tolerancia adoptada). De esta forma se valida el modelo. En la tabla también se aprecia que hay actividades que tienen igual duración tanto para las muestras de terreno como para el modelo simulado. Este se debe a que son actividades auxiliares con tiempos ya definidos, que son constantes para ambos métodos.

### 3.4.7 Diseño experimento

En las siguientes tablas (3.6, 3.7 y 3.8) se presentan las características técnico-económicas de los equipos del método tradicional:

FAMILIA	CODIGO	MARCA	MODELO	N°BRAZOS	POTENCIA (kw)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/mpf)
JUMBO	JO	ATLAS COPCO	M2C	2	18,0	26.500	1,95

Tabla 3.6 - Características jumbo método tradicional, fuente: elaboración propia.

FAMILIA	ITEM	MARCA	MODELO	CAPACIDAD (yd3)	VELOCIDAD PROMEDIO (km/hr)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/hr)
SCOOP	SO	CATERPILLAR	R1600 G	7	7,0	16.000	16,89

Tabla 3.7 - Características scoop metodología tradicional, fuente: elaboración propia.

FAMILIA	ITEM	MARCA	MODELO	CAPACIDAD (m3)	VELOCIDAD PROMEDIO (km/hr)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/hr)
DUMPER	DO	MERCEDES BENZ	3344	12	10,0	12.000	13,54

Tabla 3.8 - Características dumper metodología tradicional, fuente: elaboración propia.

A continuación se presentan las características técnico-económicas de los equipos del método RMD en las siguientes tablas (3.9, 3.10 y 3.11):

FAMILIA	CODIGO	MARCA	MODELO	NºBRAZOS	POTENCIA (kw)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/mpf)
JUMBO	J1	ATLAS COPCO	L2C	2	22,0	27.100	2,05
	J2	ATLAS COPCO	E3C	3	30,0	28.400	2,25
	J3	ATLAS COPCO	WE3C	3	30,0	31.500	2,70
	J4	ATLAS COPCO	XE3C	3	30,0	35.400	3,31
	J5	SANDVIK	DT1030	3	24,5	28.000	2,35
	J6	SANDVIK	DT1130	3	24,5	29.000	2,45
	J7	SANDVIK	DT1230	3	24,5	30.000	2,55

Tabla 3.9 - Características jumbo metodología RMD, fuente: elaboración propia.

FAMILIA	CODIGO	MARCA	MODELO	CAPACIDAD (yd3)	VELOCIDAD PROMEDIO (km/hr)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/hr)
SCOOP	S1	SANDVIK	TORO 0011	10,5	13,13	17.600	20,26
	S2	SANDVIK	TORO 0010	9,2	11,4	17.300	19,42

Tabla 3.10 - Características scoop metodología RMD, fuente: elaboración propia.

FAMILIA	CODIGO	MARCA	MODELO	CAPACIDAD (m3)	VELOCIDAD PROMEDIO (km/hr)	COSTO POSESIÓN (US\$/mes)	COSTO OPERACIÓN (US\$/hr)
DUMPER	D1	ATLAS COPCO	MT5020	27,8	19,32	16.200	20,70
	D2	ATLAS COPCO	MT6020	32,0	22,31	18.900	22,95
	D3	SANDVIK	TH680	48,0	30,00	19.350	23,40
	D4	SANDVIK	TH550	20,0	16,06	17.100	21,60
	D5	SANDVIK	TH540	18,0	17,81	13.950	19,80
	D6	SANDVIK	TH430	14,0	16,75	12.600	18,45
	D7	SANDVIK	TH320	10,2	18,90	10.575	15,75

Tabla 3.11 - Características dumper metodología RMD, fuente: elaboración propia.

En la tabla 3.12 se resumen los escenarios del método RMD, se preselecciona la combinación óptima del método RMD que posteriormente se compara con la metodología tradicional.

ESCENARIO	JUMBO	SCOOP	DUMPER
1	J1	S1	D1
2	J1	S2	D1
3	J2	S1	D2
4	J2	S2	D2
5	J2	S1	D3
6	J3	S2	D3
7	J6	S1	D3
8	J4	S2	D4
9	J4	S1	D5
10	J5	S2	D6

Tabla 3.12 - Resumen escenarios método RMD, fuente: elaboración propia.

### 3.4.8 Análisis de resultados

Dentro del análisis del modelo se presenta a continuación un gráfico (ver figura 3.46) de la distribución porcentual de tiempos del ciclo, observándose la importancia de la actividad retiro de marina (21%) frente al resto de las actividades.

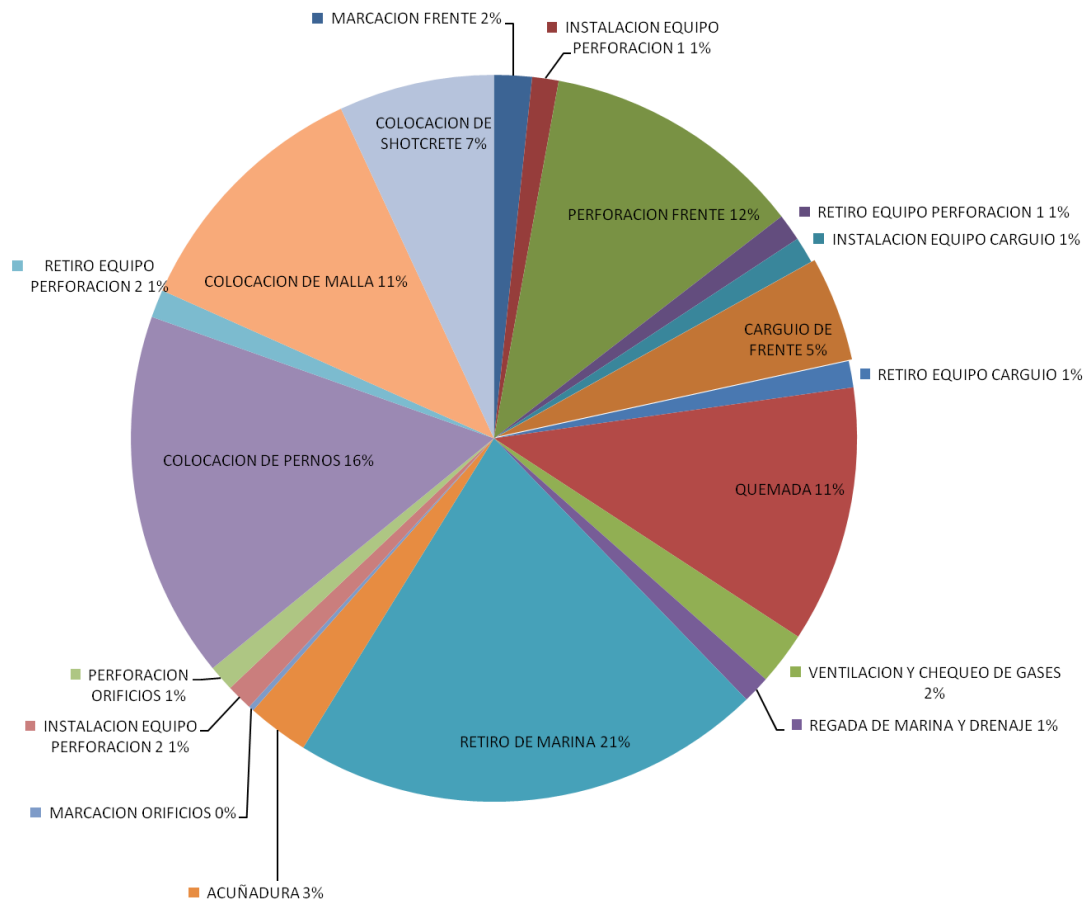


Figura 3.46 - Gráfico de distribución de tiempos de actividades, fuente: elaboración propia.

Del gráfico anterior si se selecciona las actividades en donde participan los equipos críticos (jumbo, scoop y dumper) se obtiene el gráfico de la figura 3.47:

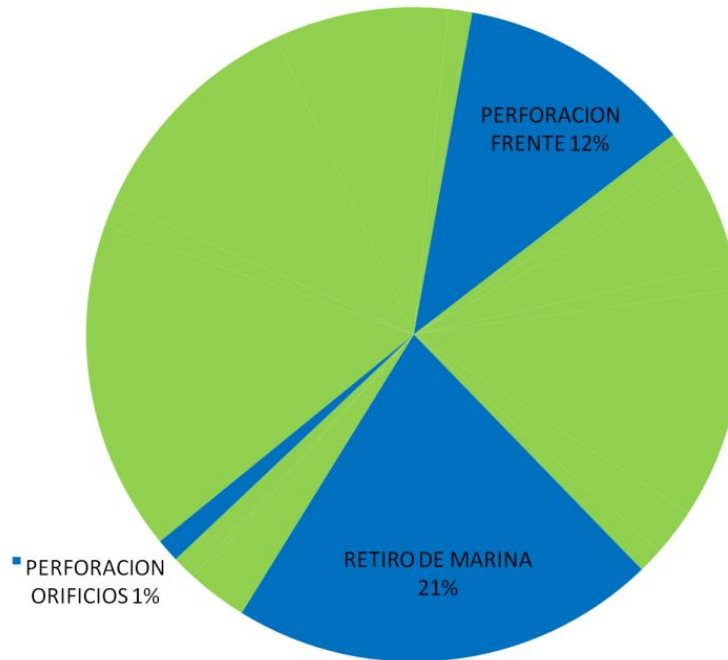


Figura 3.47 - Gráfico actividades equipos críticos, fuente: elaboración propia.

Esto indica que aproximadamente un tercio de la duración del ciclo está en función de los equipos críticos (jumbo, scoop y dumper).

### Indicadores de Desempeño

- 1) Avance mensual: El avance mensual consiste en la cantidad de metros construidos de túnel en un mes, expresado en [ml/mes]. Es un parámetro técnico donde se escoge el mayor valor.
- 2) Costo Unitario: El costo unitario por metro de avance es un parámetro económico, clave a la hora de seleccionar una alternativa, ya que define los costos proyectados. Se expresan en [US\$/ml], y debe escogerse el menor valor.

Es claro que la elección óptima es satisfacer ambas condiciones, es decir lograr la mayor cantidad de metros construidos al menor costo, concepto conocido como eficacia y eficiencia del modelo.

En la tabla 3.13 se presentan los valores introducidos en la simulación:

ESCENARIO	LARGO PERFORACION(m)	MARCACION POR TIRO (seg)	VENTILACION (min)	CAPACIDAD BALDE SCOOP (yd3)	VELOCIDAD PROMEDIO SCOOP (km/hr)	COSTO POSESION SCOOP (US\$/mes)	COSTO OPERACION SCOOP (US\$/hr)	CAPACIDAD TOLVA DUMPER (m3)	VELOCIDAD PROMEDIO DUMPER (km/hr)	COSTO POSESION DUMPER (US\$/mes)	COSTO OPERACION DUMPER (US\$/hr)	BRAZO N°1 (SI=1,NO=2)	BRAZO N°2 (SI=1,NO=2)	BRAZO N°3 (SI=1,NO=2)	POTENCIA PERFORADORA (kw)	SOBRE-EXCAVACION (%/m)	COSTO POSESION JUMBO (US\$/mes)	COSTO OPERACION JUMBO (US\$/mpf)
ESCENARIO 1: J1+S1+D1	6,1	0	15	10,5	13,13	17600	20,26	27,8	19,32	16.200	20,70	1	1	0	22,0	0,0	27.100	2,05
ESCENARIO 2: J1+S2+D1	6,1	0	15	9,2	11,4	17200	19,12	27,8	19,32	16.200	20,70	1	1	0	22,0	0,0	27.100	2,05
ESCENARIO 3: J2+S1+D2	6,1	0	15	10,5	13,13	17600	20,26	32,0	22,31	18.900	22,95	1	1	1	30,0	0,0	28.400	2,25
ESCENARIO 4: J2+S2+D2	6,1	0	15	9,2	11,4	17200	19,12	32,0	22,31	18.900	22,95	1	1	1	30,0	0,0	28.400	2,25
ESCENARIO 5: J2+S1+D3	6,1	0	15	10,5	13,13	17600	20,26	48,0	30,00	19.350	23,40	1	1	1	30,0	0,0	28.400	2,25
ESCENARIO 6: J2+S2+D3	6,1	0	15	9,2	11,4	17200	19,12	48,0	30,00	19.350	23,40	1	1	1	30,0	0,0	31.500	2,70
ESCENARIO 7: J4+S1+D3	6,1	0	15	10,5	13,13	17600	20,26	48,0	30,00	19.350	23,40	1	1	1	24,5	0,0	29.000	2,45
ESCENARIO 8: J4+S2+D4	6,1	0	15	9,2	11,4	17200	19,12	20,0	16,06	17.100	21,60	1	1	1	30,0	0,0	35.400	3,31
ESCENARIO 9: J4+S1+D5	6,1	0	15	10,5	13,13	17600	20,26	18,0	17,81	13.950	19,80	1	1	1	30,0	0,0	35.400	3,31
ESCENARIO 10: J5+S2+D6	6,1	0	15	9,2	11,4	17200	19,12	14,0	16,75	12.600	18,45	1	1	1	24,5	0,0	28.000	2,35

Tabla n°3.13 - Resumen variables de entrada escenarios método RMD, fuente: elaboración propia.

En la tabla 3.14 se presentan los resultados obtenidos en función de los valores ingresados en la tabla 3.13:

ESCENARIO	AVANCE MENSUAL (m/mes)	COSTO TOTAL EQUIPOS (US\$/mes)	DURACION MARCACION FRENTE (min)	DURACION PERFORACION FRENTE (min)	DURACION VENTILACION Y CHEQUEO DE GASES (min)	DURACION RETIRO DE MARINA (min)	DURACION MARCACION ORIFICIOS (min)	DURACION PERFORACION ORIFICIOS (min)	COSTO UNITARIO EQUIPOS POR AVANCE (US\$/m)	PROYECCION COSTO EQUIPOS (450 m) (US\$)	PROYECCION DURACION (450 m) (días)
ESCENARIO 1: J1+S1+D1	164,15	62.747	0,00	173,17	15,00	131,07	0,00	12,07	344,06	154.827	82
ESCENARIO 2: J1+S2+D1	162,50	62.349	0,00	173,17	15,00	135,52	0,00	12,07	345,40	155.430	83
ESCENARIO 3: J2+S1+D2	175,68	66.911	0,00	100,13	15,00	110,38	0,00	6,45	342,78	154.251	77
ESCENARIO 4: J2+S2+D2	175,68	66.513	0,00	100,13	15,00	114,83	0,00	6,45	340,74	153.333	77
ESCENARIO 5: J2+S1+D3	181,17	67.334	0,00	100,13	15,00	74,52	0,00	6,45	334,50	150.525	75
ESCENARIO 6: J2+S2+D3	180,62	70.422	0,00	100,13	15,00	78,97	0,00	6,45	350,93	157.919	75
ESCENARIO 7: J4+S1+D3	175,68	68.105	0,00	122,60	15,00	74,52	0,00	7,90	348,90	157.005	77
ESCENARIO 8: J4+S2+D4	164,70	72.674	0,00	100,13	15,00	193,26	0,00	6,45	397,12	178.704	82
ESCENARIO 9: J4+S1+D5	164,70	69.917	0,00	100,13	15,00	196,28	0,00	6,45	382,06	171.927	82
ESCENARIO 10: J5+S2+D6	153,72	59.973	0,00	122,60	15,00	257,54	0,00	7,90	351,13	158.009	88

Tabla 3.14 - Resumen estadísticos de salida escenarios método RMD, fuente: elaboración propia.

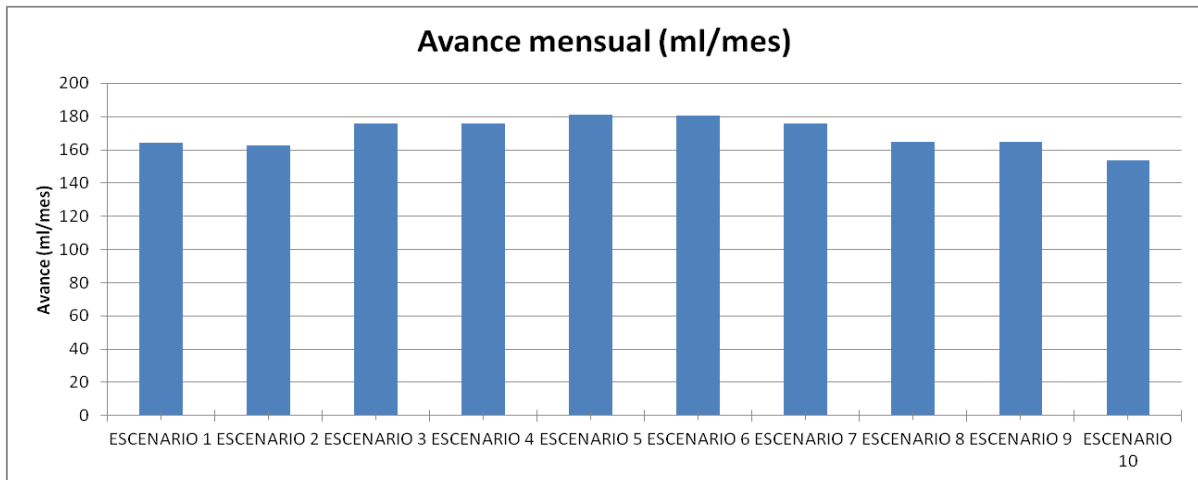


Figura 3.48 - Gráfico comparativo avance mensual, fuente: elaboración propia.

De la figura 3.48 se desprende que los escenarios 5 y 6 pueden ser elecciones apropiadas. Sin embargo, en el siguiente gráfico (figura 3.49) se observa claramente que el escenario 5 presenta un menor costo unitario.

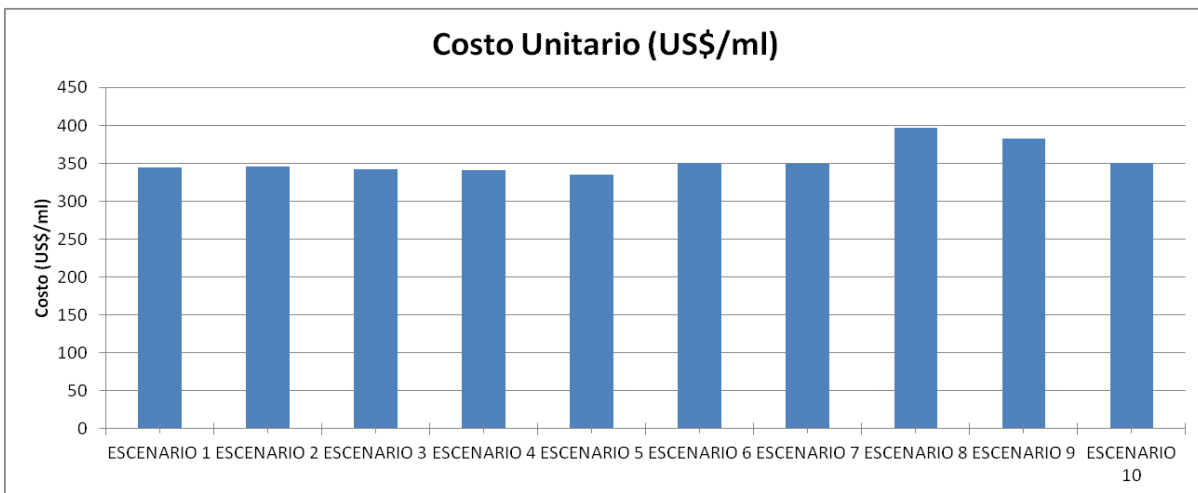


Figura 3.49 - Gráfico comparativo costo unitario equipos por avance, fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, debe elegirse el escenario 5 compuesto por el siguiente set de equipos:

- 1 unidad Jumbo Atlas Copco E3C
- 1 unidad Scoop Sandvik Toro 0011
- 2 unidades Dumper Sandvik TH680

Este escenario logra el mejor desempeño en ambos indicadores, 181,17 [ml/mes] y 334,50 [US\$/ml] respectivamente.

Después el escenario óptimo de acuerdo al método RMD, se compara con los resultados del método tradicional, obteniendo los resultados mostrados en la figura 3.50:

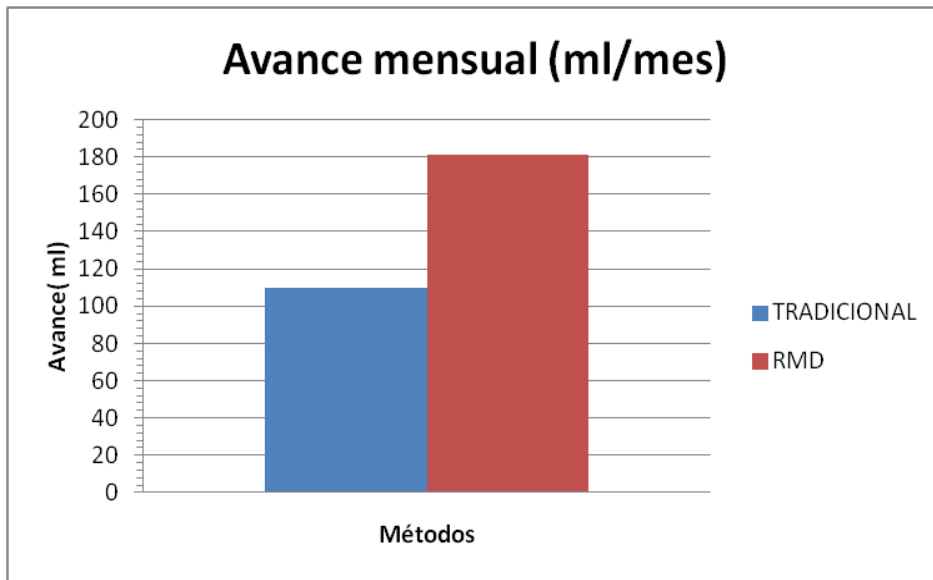


Figura 3.50 - Gráfico avance mensual método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

Se desprende de la figura 3.50 que el avance mensual con el método RMD es un 66% superior al método tradicional, lo que significa un incremento sustancial a nivel operacional.

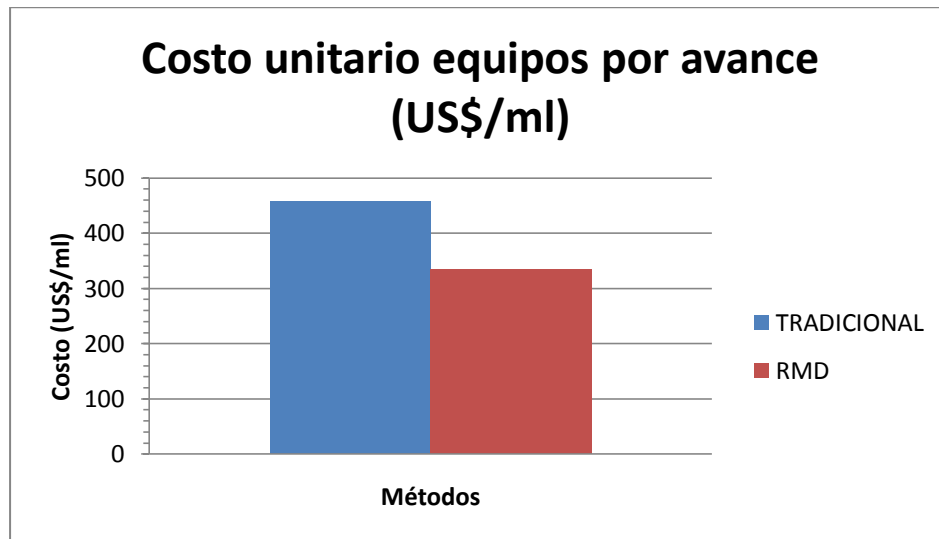


Figura 3.51 - Gráfico costo unitario equipos por avance método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

En la figura 3.51 se aprecia que, si bien el método RMD utiliza equipos de última generación (mayor costo), el avance es significativamente mayor generando una disminución del costo por metro lineal en un 27% lo que se traduce en aumento de las utilidades de la empresa, al producir un ahorro de 123,7 [US\$/m lineal].

Si se realiza una comparación de las actividades principales analizando la duración del método tradicional respecto del método RMD. Para poder comparar en forma correcta las cantidades se utilizó una unidad común [min/ml].

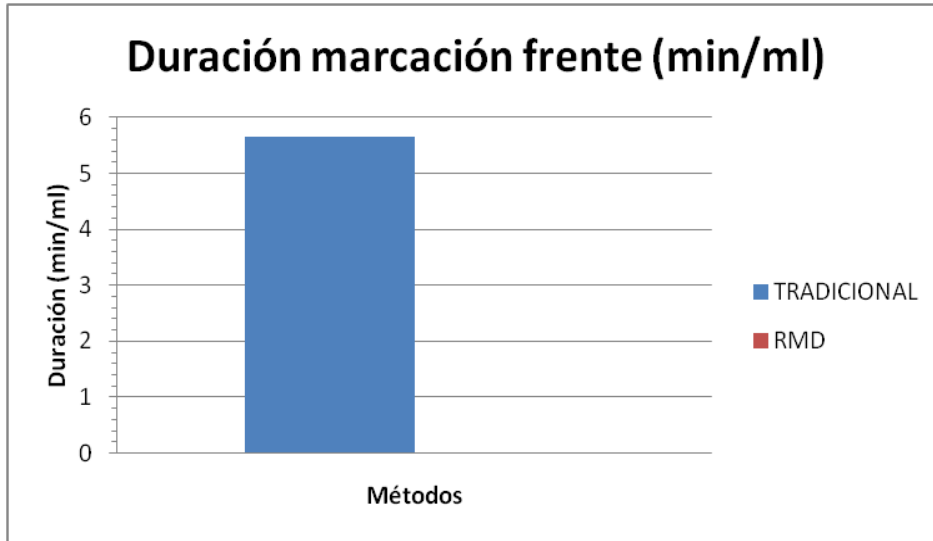


Figura 3.52 - Gráfico duración actividad marcación frente método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

En la “marcación de la frente” (figura 3.52) es claro que se ahorra un 100% del tiempo ya que el tiempo efectuado en esta actividad por el método RMD es nulo, ya que en él se utiliza marcación láser.

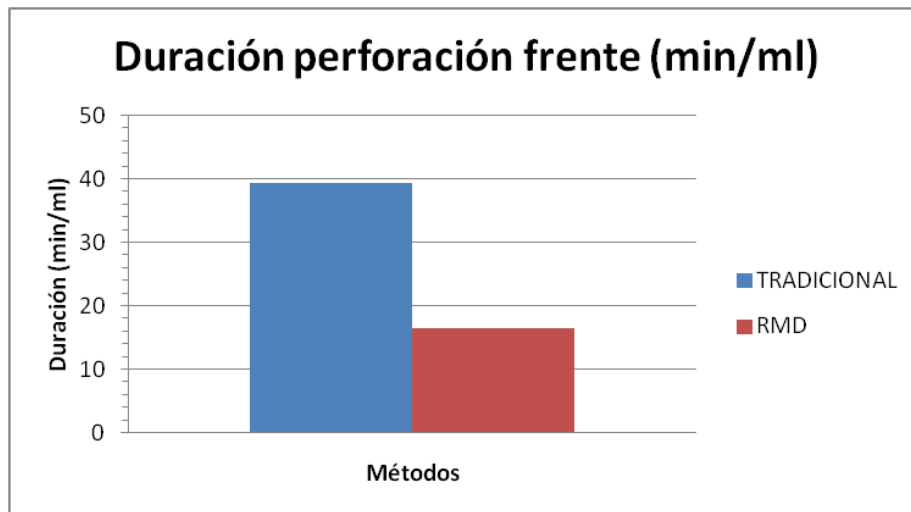


Figura 3.53 - Gráfico duración actividad perforación frente método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

En la duración de la perforación de frente (figura 3.53), se aprecia que la duración disminuye en un 58%. Esto se logra principalmente gracias a la utilización de jumbos de mayor número de brazos y perforadoras con velocidad de perforación muy superior.

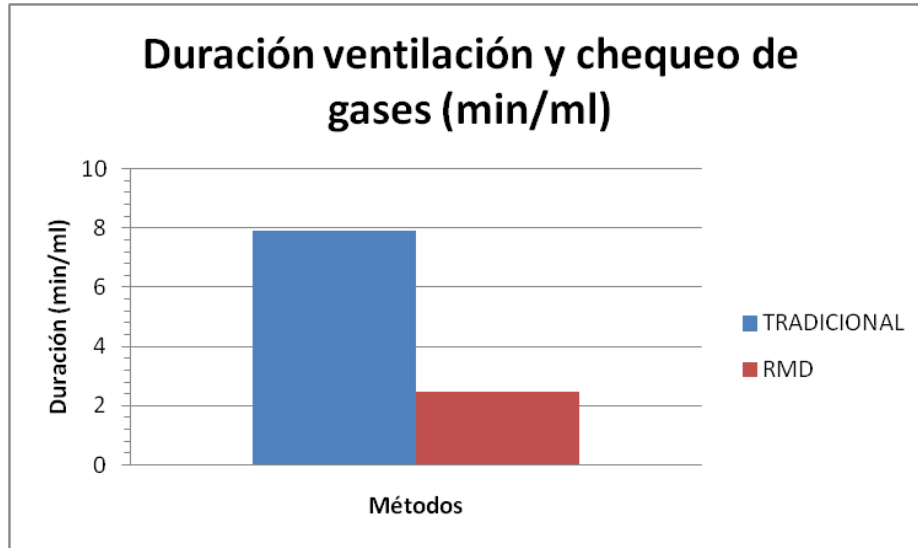


Figura 3.54 - Gráfico duración actividad ventilación y chequeo de gases método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

Producto del uso de emulsiones en el método RMD frente al uso de ANFO en el método tradicional, la ventilación y chequeo de gases baja en un 69% (figura 3.54).

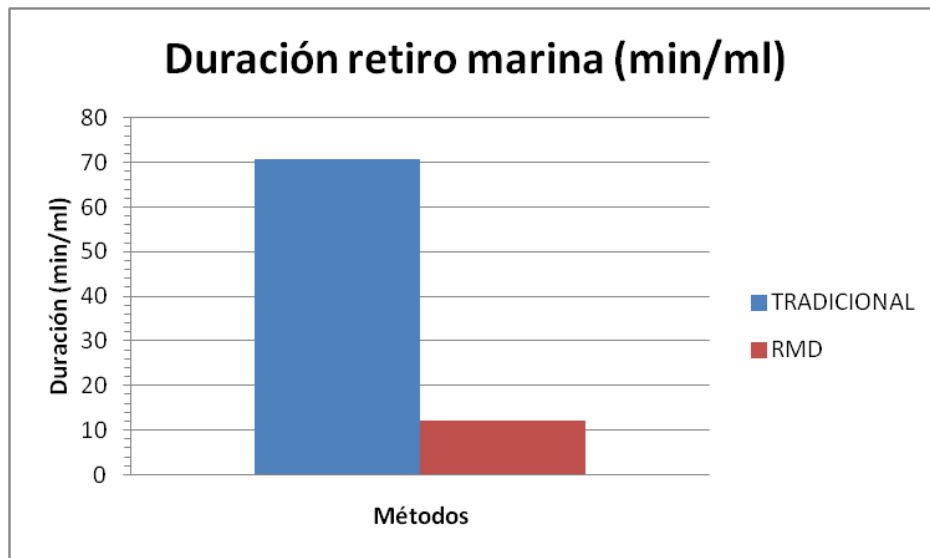


Figura 3.55 - Gráfico duración actividad retiro de marina método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

De la figura 3.55 se aprecia claramente las mejoras en el tiempo del ciclo ofrecidas por el método RMD frente al tradicional. Esto es principalmente gracias a la incorporación de equipos con mayor capacidad y velocidad, entre otros factores. Se logra una disminución de un 83% en la duración de la actividad.

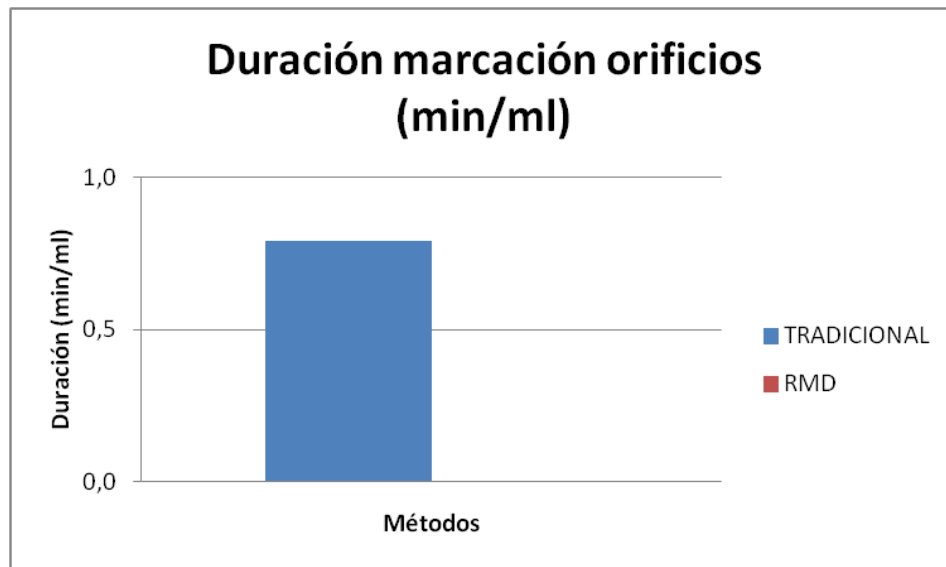


Figura 3.56 - Gráfico duración actividad marcación orificios método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

En la marcación de los orificios (figura 3.56) se ahorra un 100% del tiempo ya que el tiempo efectuado en esta actividad por el método RMD es nulo, ya que utiliza marcación láser.

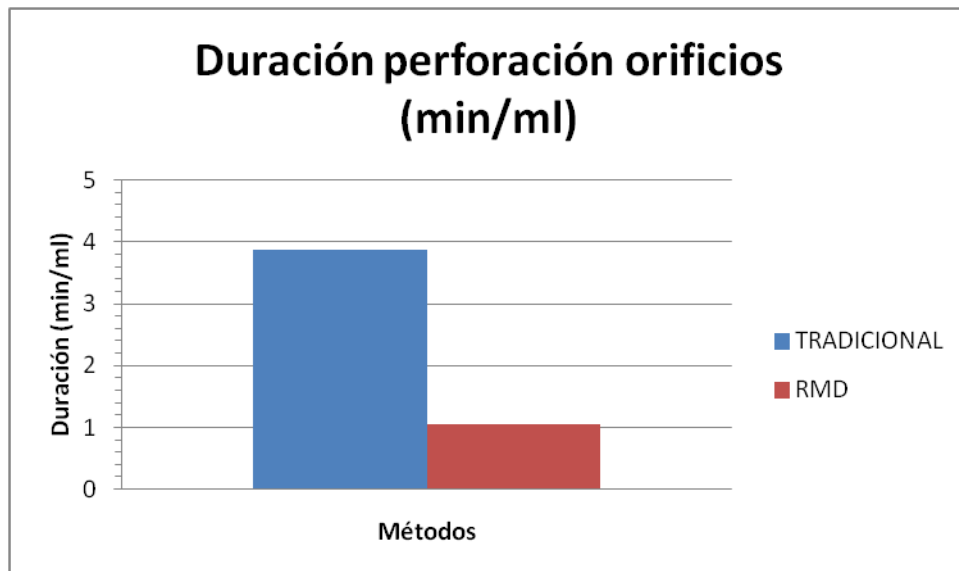


Figura 3.57 - Gráfico duración actividad perforación orificios método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

En la duración de la perforación de frente (figura 3.57) se aprecia que la duración disminuye en un 58%, esto se logra principalmente gracias a la utilización de jumbos de mayor número de brazos y perforadoras con velocidad de perforación muy superior.

Si se sigue con el análisis se puede ir más allá y proyectar que pasaría con el proyecto original (450 ml) de construcción del túnel.

En el siguiente gráfico (figura 3.58) se aprecia que al concluir los 450 [m] lineales debería lograrse un ahorro por concepto de equipos de US\$55.665.

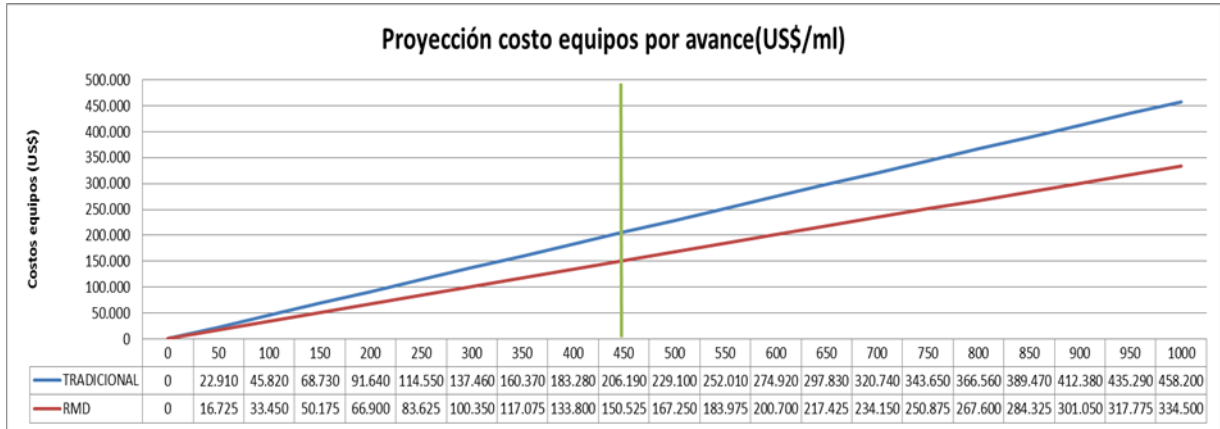


Figura 3.58 - Gráfico proyección costos equipos por avance método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

Si se realiza un análisis similar se puede estimar un tiempo promedio de duración del proyecto, haciendo hincapié en que es un valor referencial desde el punto de vista de las interferencias y/o alteraciones que sufra el proyecto en su transcurso como cualquier eventualidad no considerada.

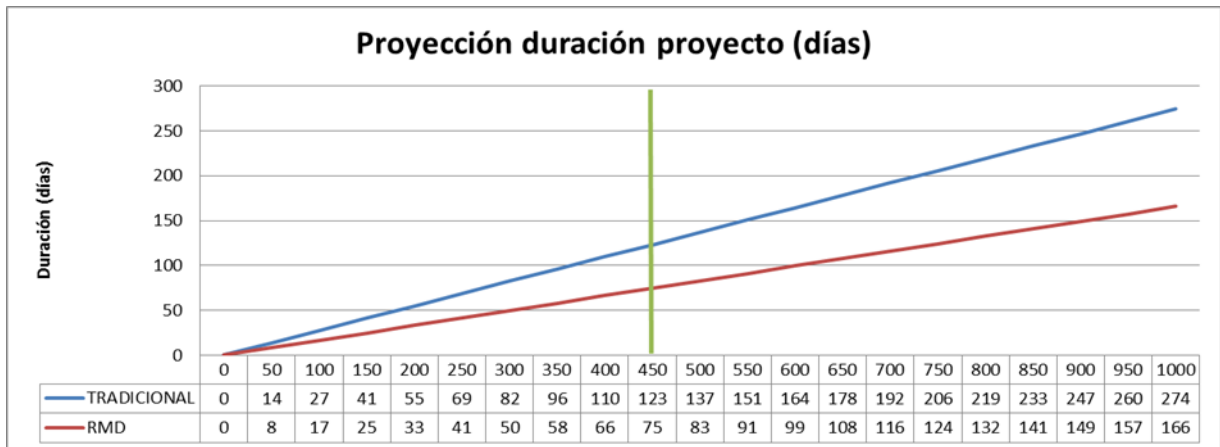


Figura 3.59 Gráfico proyección duración total construcción método tradicional v/s RMD, fuente: elaboración propia.

Del gráfico (figura 3.59) se desprende que para los 450 [m] lineales según el método tradicional el proyecto duraría 123 [días] versus los 75 [días] que tomaría el método RMD. Este ahorro de 48 [días] que equivale un 39%, no sólo genera disminución de tiempo, si no que conlleva un costo de oportunidad enorme, dado que todos los recursos programados podrían ser llevados a otra frente de trabajo.

En el ANEXO 6 se encuentra el manual de usuario del modelo de selección de equipos el cual viene incluido en el CD-ROM. Adicionalmente viene incluido el software ARENA en su versión académica junto al modelo de simulación construido.

## Capítulo 4. Conclusiones y recomendaciones

Una vez finalizado los análisis del presente Trabajo de Título, se puede afirmar que se han cumplido los resultados esperados:

- Minimizar la incertidumbre de la toma de decisión para la adquisición de los equipos.
- Eficacia y eficiencia en el Desarrollo Rápido de Túneles.
- Aumento de la productividad mediante la incorporación de equipos de mayor tecnología respecto de equipos tradicionales.

Se demuestra lo crítico que resulta la elección de los equipos, para proyectos de construcción de túneles, y cómo esta decisión puede afectar considerablemente no sólo el avance del proyecto sino que los costos del mismo.

Una de las variables claves del método RMD es el uso de disparos más largos y esto afecta directamente la producción mensual. A medida que los disparos son más largos se necesitan menos ciclos para lograr la cantidad de metros programados, y por ende las actividades auxiliares como instalación y retiro de equipos, quemada, acuñadura, etc. Esto va directamente relacionado con el costo de oportunidad, ya que los recursos destinados a esas actividades auxiliares pueden emplearse en otra labor.

Con respecto a los resultados esperados, en especial a la incertidumbre, esta disminuye al mínimo. Debido a que con un estudio de este nivel, es posible tomar decisiones no sólo basadas en experiencias, sino que a través de una actual y potente herramienta de análisis que es la simulación. En términos prácticos, se lograron los indicadores operacionales esperados del planteamiento del problema (reducción de costo unitario) en US\$ 55.665 para los 450 [m] lineales, reducción plazos de ejecución en 48 días y aumento productividad sobre un 66%.

A continuación se presenta gráfico comparativo de los distintos escenarios:

### Avance mensual

$H_0$ : Método RMD obtiene mejores avances mensuales que la metodología tradicional.

En la figura 4.1, se observa que de los 10 escenarios planteados el 100% cumple la hipótesis: es decir, la probabilidad de ocurrencia es 1. Por lo cual la hipótesis no es rechazada.

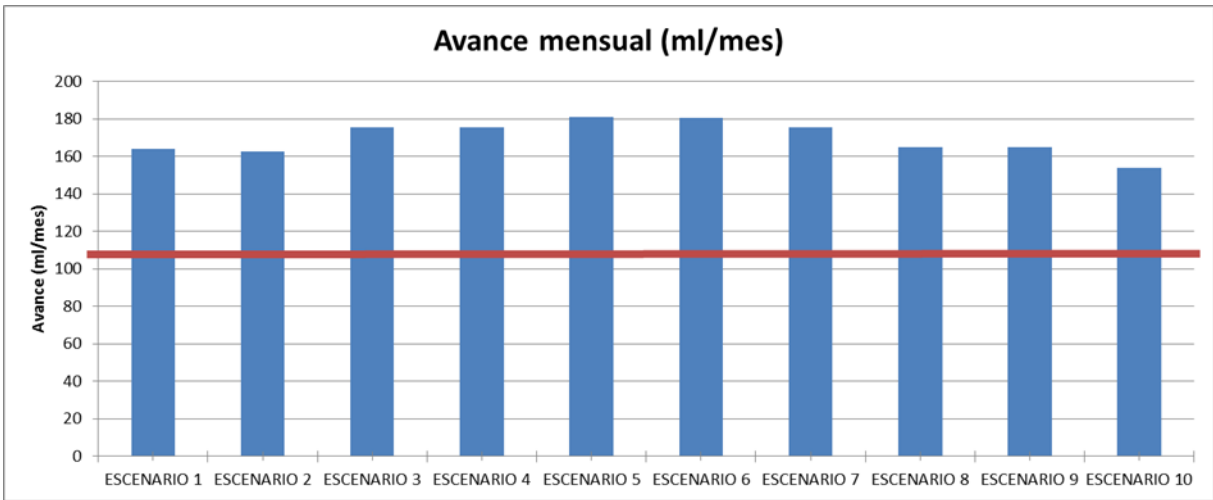


Figura 4.1 - Gráfico comparativo avance mensual de escenarios RMD v/s metodología tradicional, fuente: elaboración propia.

### Costo Unitario

$H_0$ : Método RMD reduce los costos unitarios frente a la metodología tradicional.

En la figura 4.2, se observa que de los 10 escenarios planteados el 100% cumple la hipótesis: es decir, la probabilidad de ocurrencia es 1. Por lo cual la hipótesis no es rechazada.

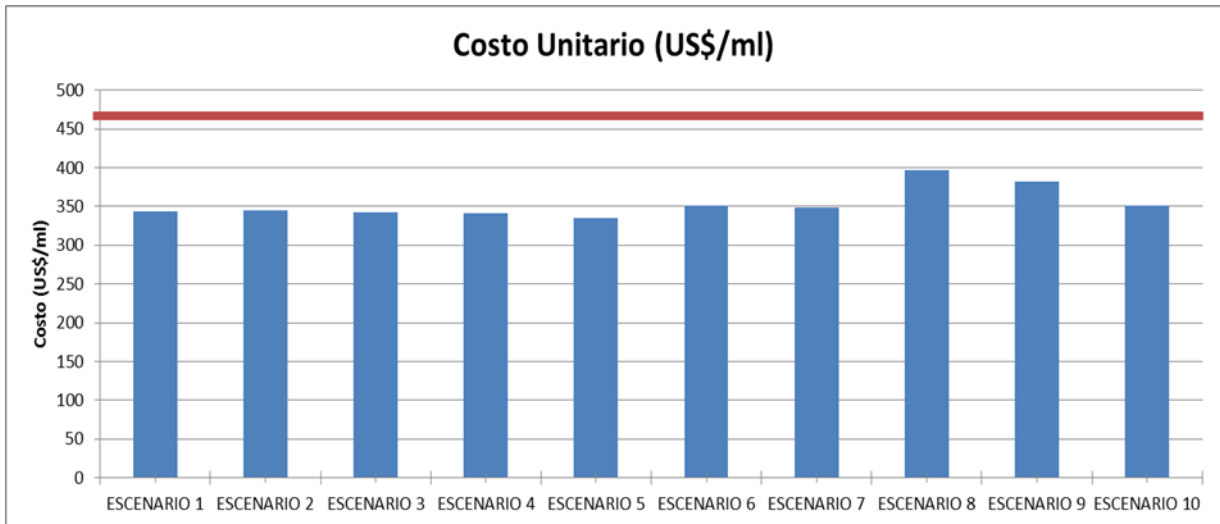


Figura 4.2 - Gráfico comparativo costo unitario equipos críticos por unidad de avance método RMD v/s metodología tradicional, fuente: elaboración propia.

La evaluación del modelo fue analizado con variables reales, las cuales pueden ser mejoradas o cambiadas para optimizar el desempeño. Esto le da la cualidad de flexible al modelo, sirviendo de base para futuros estudios referentes al tema. Las posibilidades son múltiples y variadas quedando abierto el tema para futuros estudios en este tipo.

## Referencias Bibliográficas

- Law & Kelton, *Simulation whit Arena*, Illinois, Mc Graw Hill, 2000.
- Carlos López Jimeno, *Manual de perforación y voladura*, Madrid, Mc Graw Hill, 1998.
- S. Fuster, *Elaboración de una guía práctica para el conjunto de análisis y simulación de operaciones de construcción*, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2004.
- A. Rodríguez, *Influencia en los costos consecuenciales de las fallas de equipos de construcción de túneles en las políticas de reemplazo*, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009.
- Codelco División El Teniente, *Informe Proyecto Nuevo Nivel Mina*, 2011.
- Cadia East Project, *Case of study Rapid Mine Devolpment*, 2009.
- Empresa Atlas Copco, [www.atlascopco.cl](http://www.atlascopco.cl)
- Empresa Sandvik, [www.sandvik.cl](http://www.sandvik.cl)
- Empresa Kauffmann, [www.kauffman.cl](http://www.kauffman.cl)
- Empresa Caterpillar, [www.cat.cl](http://www.cat.cl)

## **ANEXO 1**

### **Distribución de duración de actividades**

## Lista de tablas

Tabla A1.1 – Duración actividad marcación de la frente.....	100
Tabla A1.2 – Duración actividad instalación equipo de perforación 1.....	101
Tabla A1.3 – Duración actividad perforación de frente.....	102
Tabla A1.4 – Duración actividad retiro equipo de perforación 1.....	103
Tabla A1.5 – Duración actividad instalación equipo de carguío.....	104
Tabla A1.6 – Duración actividad carguío de frente.....	105
Tabla A1.7 – Duración actividad retiro equipo de carguío.....	106
Tabla A1.8 – Duración actividad quemada.....	107
Tabla A1.9 – Duración actividad ventilación y chequeo de gases.....	108
Tabla A1.10 – Duración actividad regado de marina y drenaje.....	109
Tabla A1.11 – Duración actividad retiro de marina.....	110
Tabla A1.12 – Duración actividad acuñadura.....	111
Tabla A1.13 – Duración actividad marcación de orificios.....	112
Tabla A1.14 – Duración actividad instalación equipo de perforación 2.....	113
Tabla A1.15 – Duración actividad perforación orificios.....	114
Tabla A1.16 – Duración actividad colocación de pernos.....	115
Tabla A1.17 – Duración actividad retiro equipo de perforación 2.....	116
Tabla A1.18 – Duración actividad colocación de malla.....	117
Tabla A1.19 – Duración actividad colocación de shotcrete.....	118

## Actividad N°1: Marcación de la frente

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	30	41	12/03/2012	15	81	21/04/2012	40
2	02/02/2012	35	42	13/03/2012	35	82	22/04/2012	30
3	03/02/2012	25	43	14/03/2012	25	83	23/04/2012	40
4	04/02/2012	25	44	15/03/2012	35	84	24/04/2012	25
5	05/02/2012	20	45	16/03/2012	35	85	25/04/2012	20
6	06/02/2012	30	46	17/03/2012	40	86	26/04/2012	25
7	07/02/2012	25	47	18/03/2012	40	87	27/04/2012	20
8	08/02/2012	30	48	19/03/2012	25	88	28/04/2012	15
9	09/02/2012	25	49	20/03/2012	35	89	29/04/2012	20
10	10/02/2012	35	50	21/03/2012	30	90	30/04/2012	30
11	11/02/2012	30	51	22/03/2012	35	91	01/05/2012	40
12	12/02/2012	20	52	23/03/2012	25	92	02/05/2012	30
13	13/02/2012	20	53	24/03/2012	30	93	03/05/2012	35
14	14/02/2012	35	54	25/03/2012	25	94	04/05/2012	25
15	15/02/2012	25	55	26/03/2012	25	95	05/05/2012	20
16	16/02/2012	20	56	27/03/2012	25	96	06/05/2012	40
17	17/02/2012	35	57	28/03/2012	30	97	07/05/2012	35
18	18/02/2012	30	58	29/03/2012	30	98	08/05/2012	30
19	19/02/2012	35	59	30/03/2012	20	99	09/05/2012	25
20	20/02/2012	30	60	31/03/2012	25	100	10/05/2012	30
21	21/02/2012	25	61	01/04/2012	35	101	11/05/2012	30
22	22/02/2012	20	62	02/04/2012	20	102	12/05/2012	25
23	23/02/2012	25	63	03/04/2012	25	103	13/05/2012	20
24	24/02/2012	30	64	04/04/2012	25	104	14/05/2012	30
25	25/02/2012	25	65	05/04/2012	20	105	15/05/2012	25
26	26/02/2012	25	66	06/04/2012	30	106	16/05/2012	20
27	27/02/2012	30	67	07/04/2012	30	107	17/05/2012	35
28	28/02/2012	25	68	08/04/2012	25	108	18/05/2012	25
29	29/02/2012	40	69	09/04/2012	40	109	19/05/2012	20
30	01/03/2012	40	70	10/04/2012	25	110	20/05/2012	30
31	02/03/2012	25	71	11/04/2012	30	111	21/05/2012	45
32	03/03/2012	20	72	12/04/2012	25	112	22/05/2012	35
33	04/03/2012	25	73	13/04/2012	20	113	23/05/2012	30
34	05/03/2012	25	74	14/04/2012	35	114	24/05/2012	30
35	06/03/2012	35	75	15/04/2012	40	115	25/05/2012	30
36	07/03/2012	30	76	16/04/2012	25	116	26/05/2012	40
37	08/03/2012	25	77	17/04/2012	25	117	27/05/2012	30
38	09/03/2012	25	78	18/04/2012	30	118	28/05/2012	35
39	10/03/2012	30	79	19/04/2012	25	119	29/05/2012	25
40	11/03/2012	30	80	20/04/2012	30	120	30/05/2012	25

Tabla A1.1 – Duración actividad marcación de la frente.

## Actividad N°2: Instalación equipo perforación 1

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	15	41	12/03/2012	15	81	21/04/2012	15
2	02/02/2012	15	42	13/03/2012	15	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	10	43	14/03/2012	20	83	23/04/2012	20
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	20	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	15	45	16/03/2012	20	85	25/04/2012	20
6	06/02/2012	20	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	10
7	07/02/2012	20	47	18/03/2012	15	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	20	48	19/03/2012	20	88	28/04/2012	15
9	09/02/2012	10	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	20
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	10	91	01/05/2012	15
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	15	92	02/05/2012	10
13	13/02/2012	20	53	24/03/2012	20	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	20	94	04/05/2012	15
15	15/02/2012	15	55	26/03/2012	15	95	05/05/2012	20
16	16/02/2012	15	56	27/03/2012	20	96	06/05/2012	20
17	17/02/2012	20	57	28/03/2012	15	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	20	58	29/03/2012	10	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	20	99	09/05/2012	20
20	20/02/2012	10	60	31/03/2012	20	100	10/05/2012	15
21	21/02/2012	15	61	01/04/2012	20	101	11/05/2012	10
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	15	102	12/05/2012	20
23	23/02/2012	15	63	03/04/2012	20	103	13/05/2012	15
24	24/02/2012	25	64	04/04/2012	20	104	14/05/2012	15
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	15	105	15/05/2012	15
26	26/02/2012	15	66	06/04/2012	10	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	15	67	07/04/2012	15	107	17/05/2012	20
28	28/02/2012	20	68	08/04/2012	15	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	15	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	15
30	01/03/2012	15	70	10/04/2012	15	110	20/05/2012	20
31	02/03/2012	10	71	11/04/2012	20	111	21/05/2012	10
32	03/03/2012	20	72	12/04/2012	15	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	25	73	13/04/2012	15	113	23/05/2012	15
34	05/03/2012	25	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	20
35	06/03/2012	20	75	15/04/2012	15	115	25/05/2012	20
36	07/03/2012	25	76	16/04/2012	20	116	26/05/2012	15
37	08/03/2012	15	77	17/04/2012	15	117	27/05/2012	15
38	09/03/2012	15	78	18/04/2012	15	118	28/05/2012	20
39	10/03/2012	20	79	19/04/2012	20	119	29/05/2012	20
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	10

Tabla A1.2 – Duración actividad instalación equipo de perforación 1.

## Actividad N°3: Perforación de la frente

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	170	41	12/03/2012	195	81	21/04/2012	170
2	02/02/2012	155	42	13/03/2012	155	82	22/04/2012	195
3	03/02/2012	150	43	14/03/2012	155	83	23/04/2012	135
4	04/02/2012	135	44	15/03/2012	135	84	24/04/2012	165
5	05/02/2012	185	45	16/03/2012	165	85	25/04/2012	190
6	06/02/2012	165	46	17/03/2012	160	86	26/04/2012	130
7	07/02/2012	115	47	18/03/2012	170	87	27/04/2012	175
8	08/02/2012	185	48	19/03/2012	170	88	28/04/2012	105
9	09/02/2012	100	49	20/03/2012	140	89	29/04/2012	120
10	10/02/2012	210	50	21/03/2012	185	90	30/04/2012	175
11	11/02/2012	155	51	22/03/2012	125	91	01/05/2012	120
12	12/02/2012	175	52	23/03/2012	185	92	02/05/2012	155
13	13/02/2012	220	53	24/03/2012	160	93	03/05/2012	175
14	14/02/2012	175	54	25/03/2012	150	94	04/05/2012	200
15	15/02/2012	185	55	26/03/2012	165	95	05/05/2012	125
16	16/02/2012	190	56	27/03/2012	135	96	06/05/2012	120
17	17/02/2012	180	57	28/03/2012	165	97	07/05/2012	200
18	18/02/2012	150	58	29/03/2012	185	98	08/05/2012	165
19	19/02/2012	165	59	30/03/2012	105	99	09/05/2012	205
20	20/02/2012	170	60	31/03/2012	120	100	10/05/2012	190
21	21/02/2012	150	61	01/04/2012	130	101	11/05/2012	160
22	22/02/2012	195	62	02/04/2012	175	102	12/05/2012	130
23	23/02/2012	125	63	03/04/2012	170	103	13/05/2012	155
24	24/02/2012	150	64	04/04/2012	195	104	14/05/2012	150
25	25/02/2012	180	65	05/04/2012	190	105	15/05/2012	170
26	26/02/2012	170	66	06/04/2012	135	106	16/05/2012	160
27	27/02/2012	115	67	07/04/2012	175	107	17/05/2012	120
28	28/02/2012	115	68	08/04/2012	145	108	18/05/2012	145
29	29/02/2012	155	69	09/04/2012	145	109	19/05/2012	100
30	01/03/2012	165	70	10/04/2012	160	110	20/05/2012	195
31	02/03/2012	140	71	11/04/2012	165	111	21/05/2012	120
32	03/03/2012	125	72	12/04/2012	155	112	22/05/2012	195
33	04/03/2012	140	73	13/04/2012	150	113	23/05/2012	185
34	05/03/2012	125	74	14/04/2012	160	114	24/05/2012	135
35	06/03/2012	130	75	15/04/2012	130	115	25/05/2012	155
36	07/03/2012	170	76	16/04/2012	160	116	26/05/2012	160
37	08/03/2012	135	77	17/04/2012	180	117	27/05/2012	195
38	09/03/2012	165	78	18/04/2012	170	118	28/05/2012	100
39	10/03/2012	160	79	19/04/2012	135	119	29/05/2012	140
40	11/03/2012	205	80	20/04/2012	185	120	30/05/2012	150

Tabla A1.3 – Duración actividad perforación de la frente.

## Actividad N°4: Retiro equipo perforación 1

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	15	41	12/03/2012	20	81	21/04/2012	20
2	02/02/2012	25	42	13/03/2012	25	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	25	43	14/03/2012	10	83	23/04/2012	25
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	15	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	15	45	16/03/2012	25	85	25/04/2012	20
6	06/02/2012	25	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	20
7	07/02/2012	15	47	18/03/2012	20	87	27/04/2012	20
8	08/02/2012	20	48	19/03/2012	15	88	28/04/2012	20
9	09/02/2012	10	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	25
10	10/02/2012	20	50	21/03/2012	15	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	15	91	01/05/2012	25
12	12/02/2012	25	52	23/03/2012	15	92	02/05/2012	20
13	13/02/2012	15	53	24/03/2012	10	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	15	94	04/05/2012	25
15	15/02/2012	25	55	26/03/2012	15	95	05/05/2012	25
16	16/02/2012	20	56	27/03/2012	15	96	06/05/2012	25
17	17/02/2012	15	57	28/03/2012	15	97	07/05/2012	20
18	18/02/2012	15	58	29/03/2012	20	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	20	99	09/05/2012	20
20	20/02/2012	15	60	31/03/2012	25	100	10/05/2012	30
21	21/02/2012	20	61	01/04/2012	15	101	11/05/2012	20
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	15	102	12/05/2012	20
23	23/02/2012	15	63	03/04/2012	15	103	13/05/2012	30
24	24/02/2012	20	64	04/04/2012	15	104	14/05/2012	15
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	15	105	15/05/2012	15
26	26/02/2012	30	66	06/04/2012	15	106	16/05/2012	20
27	27/02/2012	20	67	07/04/2012	25	107	17/05/2012	15
28	28/02/2012	20	68	08/04/2012	20	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	15	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	15
30	01/03/2012	10	70	10/04/2012	25	110	20/05/2012	20
31	02/03/2012	15	71	11/04/2012	15	111	21/05/2012	10
32	03/03/2012	20	72	12/04/2012	25	112	22/05/2012	20
33	04/03/2012	10	73	13/04/2012	20	113	23/05/2012	20
34	05/03/2012	20	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	20
35	06/03/2012	25	75	15/04/2012	25	115	25/05/2012	15
36	07/03/2012	20	76	16/04/2012	20	116	26/05/2012	15
37	08/03/2012	15	77	17/04/2012	20	117	27/05/2012	15
38	09/03/2012	15	78	18/04/2012	20	118	28/05/2012	15
39	10/03/2012	15	79	19/04/2012	20	119	29/05/2012	20
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	25	120	30/05/2012	15

Tabla A1.4 – Duración actividad retiro equipo de perforación 1.

## Actividad N°5: Instalación equipo carguío

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	25	41	12/03/2012	30	81	21/04/2012	25
2	02/02/2012	15	42	13/03/2012	15	82	22/04/2012	20
3	03/02/2012	25	43	14/03/2012	20	83	23/04/2012	20
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	20	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	15	45	16/03/2012	15	85	25/04/2012	15
6	06/02/2012	15	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	15
7	07/02/2012	20	47	18/03/2012	20	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	15	48	19/03/2012	15	88	28/04/2012	15
9	09/02/2012	20	49	20/03/2012	20	89	29/04/2012	15
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	20	51	22/03/2012	10	91	01/05/2012	15
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	15	92	02/05/2012	15
13	13/02/2012	25	53	24/03/2012	15	93	03/05/2012	20
14	14/02/2012	15	54	25/03/2012	20	94	04/05/2012	25
15	15/02/2012	15	55	26/03/2012	25	95	05/05/2012	25
16	16/02/2012	15	56	27/03/2012	15	96	06/05/2012	20
17	17/02/2012	20	57	28/03/2012	20	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	25	58	29/03/2012	20	98	08/05/2012	15
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	25	99	09/05/2012	10
20	20/02/2012	15	60	31/03/2012	20	100	10/05/2012	15
21	21/02/2012	20	61	01/04/2012	15	101	11/05/2012	15
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	15	102	12/05/2012	15
23	23/02/2012	10	63	03/04/2012	15	103	13/05/2012	10
24	24/02/2012	15	64	04/04/2012	15	104	14/05/2012	15
25	25/02/2012	20	65	05/04/2012	20	105	15/05/2012	25
26	26/02/2012	25	66	06/04/2012	25	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	25	67	07/04/2012	20	107	17/05/2012	15
28	28/02/2012	25	68	08/04/2012	15	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	30	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	10
30	01/03/2012	15	70	10/04/2012	20	110	20/05/2012	20
31	02/03/2012	20	71	11/04/2012	20	111	21/05/2012	20
32	03/03/2012	25	72	12/04/2012	15	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	10	73	13/04/2012	15	113	23/05/2012	20
34	05/03/2012	20	74	14/04/2012	15	114	24/05/2012	15
35	06/03/2012	15	75	15/04/2012	25	115	25/05/2012	15
36	07/03/2012	15	76	16/04/2012	15	116	26/05/2012	20
37	08/03/2012	15	77	17/04/2012	15	117	27/05/2012	15
38	09/03/2012	25	78	18/04/2012	15	118	28/05/2012	20
39	10/03/2012	25	79	19/04/2012	15	119	29/05/2012	15
40	11/03/2012	25	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	20

Tabla A1.5 – Duración actividad instalación equipo de carguío.

## Actividad N°6: Carguío de frente

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	55	41	12/03/2012	55	81	21/04/2012	50
2	02/02/2012	65	42	13/03/2012	60	82	22/04/2012	60
3	03/02/2012	60	43	14/03/2012	55	83	23/04/2012	60
4	04/02/2012	55	44	15/03/2012	55	84	24/04/2012	65
5	05/02/2012	60	45	16/03/2012	65	85	25/04/2012	60
6	06/02/2012	55	46	17/03/2012	65	86	26/04/2012	60
7	07/02/2012	60	47	18/03/2012	55	87	27/04/2012	65
8	08/02/2012	60	48	19/03/2012	70	88	28/04/2012	65
9	09/02/2012	60	49	20/03/2012	60	89	29/04/2012	65
10	10/02/2012	55	50	21/03/2012	55	90	30/04/2012	65
11	11/02/2012	55	51	22/03/2012	60	91	01/05/2012	55
12	12/02/2012	60	52	23/03/2012	60	92	02/05/2012	55
13	13/02/2012	60	53	24/03/2012	70	93	03/05/2012	65
14	14/02/2012	55	54	25/03/2012	60	94	04/05/2012	50
15	15/02/2012	55	55	26/03/2012	65	95	05/05/2012	55
16	16/02/2012	65	56	27/03/2012	55	96	06/05/2012	65
17	17/02/2012	60	57	28/03/2012	60	97	07/05/2012	65
18	18/02/2012	65	58	29/03/2012	60	98	08/05/2012	55
19	19/02/2012	55	59	30/03/2012	65	99	09/05/2012	60
20	20/02/2012	70	60	31/03/2012	65	100	10/05/2012	55
21	21/02/2012	60	61	01/04/2012	55	101	11/05/2012	65
22	22/02/2012	60	62	02/04/2012	70	102	12/05/2012	60
23	23/02/2012	55	63	03/04/2012	65	103	13/05/2012	55
24	24/02/2012	65	64	04/04/2012	55	104	14/05/2012	65
25	25/02/2012	65	65	05/04/2012	55	105	15/05/2012	65
26	26/02/2012	65	66	06/04/2012	60	106	16/05/2012	55
27	27/02/2012	65	67	07/04/2012	65	107	17/05/2012	60
28	28/02/2012	55	68	08/04/2012	60	108	18/05/2012	60
29	29/02/2012	55	69	09/04/2012	60	109	19/05/2012	55
30	01/03/2012	55	70	10/04/2012	60	110	20/05/2012	65
31	02/03/2012	60	71	11/04/2012	60	111	21/05/2012	60
32	03/03/2012	60	72	12/04/2012	55	112	22/05/2012	55
33	04/03/2012	65	73	13/04/2012	55	113	23/05/2012	70
34	05/03/2012	60	74	14/04/2012	50	114	24/05/2012	60
35	06/03/2012	55	75	15/04/2012	60	115	25/05/2012	60
36	07/03/2012	55	76	16/04/2012	60	116	26/05/2012	60
37	08/03/2012	55	77	17/04/2012	65	117	27/05/2012	60
38	09/03/2012	60	78	18/04/2012	55	118	28/05/2012	60
39	10/03/2012	60	79	19/04/2012	70	119	29/05/2012	55
40	11/03/2012	60	80	20/04/2012	55	120	30/05/2012	60

Tabla A1.6 – Duración actividad carguío de frente.

## Actividad N°7: Retiro equipo carguío

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	15	41	12/03/2012	20	81	21/04/2012	15
2	02/02/2012	20	42	13/03/2012	10	82	22/04/2012	25
3	03/02/2012	15	43	14/03/2012	20	83	23/04/2012	20
4	04/02/2012	25	44	15/03/2012	10	84	24/04/2012	10
5	05/02/2012	15	45	16/03/2012	15	85	25/04/2012	10
6	06/02/2012	15	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	25
7	07/02/2012	15	47	18/03/2012	15	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	15	48	19/03/2012	15	88	28/04/2012	20
9	09/02/2012	15	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	20
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	15	91	01/05/2012	25
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	25	92	02/05/2012	25
13	13/02/2012	25	53	24/03/2012	15	93	03/05/2012	25
14	14/02/2012	10	54	25/03/2012	20	94	04/05/2012	20
15	15/02/2012	20	55	26/03/2012	10	95	05/05/2012	20
16	16/02/2012	10	56	27/03/2012	20	96	06/05/2012	20
17	17/02/2012	15	57	28/03/2012	15	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	20	58	29/03/2012	25	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	25	99	09/05/2012	30
20	20/02/2012	15	60	31/03/2012	25	100	10/05/2012	30
21	21/02/2012	15	61	01/04/2012	20	101	11/05/2012	20
22	22/02/2012	20	62	02/04/2012	20	102	12/05/2012	15
23	23/02/2012	20	63	03/04/2012	15	103	13/05/2012	15
24	24/02/2012	15	64	04/04/2012	20	104	14/05/2012	10
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	15	105	15/05/2012	20
26	26/02/2012	20	66	06/04/2012	15	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	15	67	07/04/2012	15	107	17/05/2012	20
28	28/02/2012	20	68	08/04/2012	10	108	18/05/2012	25
29	29/02/2012	20	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	20
30	01/03/2012	20	70	10/04/2012	15	110	20/05/2012	15
31	02/03/2012	15	71	11/04/2012	15	111	21/05/2012	15
32	03/03/2012	30	72	12/04/2012	20	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	15	73	13/04/2012	15	113	23/05/2012	15
34	05/03/2012	15	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	25
35	06/03/2012	10	75	15/04/2012	25	115	25/05/2012	15
36	07/03/2012	15	76	16/04/2012	20	116	26/05/2012	20
37	08/03/2012	20	77	17/04/2012	20	117	27/05/2012	20
38	09/03/2012	30	78	18/04/2012	20	118	28/05/2012	25
39	10/03/2012	15	79	19/04/2012	20	119	29/05/2012	20
40	11/03/2012	20	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	25

Tabla A1.7 – Duración retiro equipo de carguío.

## Actividad N°8: Quemada

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	190	41	12/03/2012	175	81	21/04/2012	155
2	02/02/2012	220	42	13/03/2012	110	82	22/04/2012	180
3	03/02/2012	200	43	14/03/2012	270	83	23/04/2012	240
4	04/02/2012	255	44	15/03/2012	175	84	24/04/2012	145
5	05/02/2012	145	45	16/03/2012	160	85	25/04/2012	190
6	06/02/2012	195	46	17/03/2012	170	86	26/04/2012	150
7	07/02/2012	195	47	18/03/2012	85	87	27/04/2012	195
8	08/02/2012	245	48	19/03/2012	140	88	28/04/2012	145
9	09/02/2012	225	49	20/03/2012	90	89	29/04/2012	105
10	10/02/2012	155	50	21/03/2012	235	90	30/04/2012	235
11	11/02/2012	135	51	22/03/2012	145	91	01/05/2012	90
12	12/02/2012	95	52	23/03/2012	135	92	02/05/2012	105
13	13/02/2012	170	53	24/03/2012	160	93	03/05/2012	155
14	14/02/2012	140	54	25/03/2012	180	94	04/05/2012	230
15	15/02/2012	215	55	26/03/2012	140	95	05/05/2012	165
16	16/02/2012	135	56	27/03/2012	210	96	06/05/2012	130
17	17/02/2012	230	57	28/03/2012	200	97	07/05/2012	95
18	18/02/2012	175	58	29/03/2012	130	98	08/05/2012	175
19	19/02/2012	220	59	30/03/2012	190	99	09/05/2012	135
20	20/02/2012	205	60	31/03/2012	145	100	10/05/2012	160
21	21/02/2012	240	61	01/04/2012	155	101	11/05/2012	190
22	22/02/2012	150	62	02/04/2012	225	102	12/05/2012	195
23	23/02/2012	250	63	03/04/2012	150	103	13/05/2012	180
24	24/02/2012	160	64	04/04/2012	160	104	14/05/2012	230
25	25/02/2012	170	65	05/04/2012	155	105	15/05/2012	190
26	26/02/2012	190	66	06/04/2012	260	106	16/05/2012	205
27	27/02/2012	105	67	07/04/2012	170	107	17/05/2012	95
28	28/02/2012	105	68	08/04/2012	155	108	18/05/2012	130
29	29/02/2012	180	69	09/04/2012	195	109	19/05/2012	175
30	01/03/2012	200	70	10/04/2012	180	110	20/05/2012	130
31	02/03/2012	150	71	11/04/2012	215	111	21/05/2012	175
32	03/03/2012	145	72	12/04/2012	195	112	22/05/2012	265
33	04/03/2012	170	73	13/04/2012	245	113	23/05/2012	215
34	05/03/2012	145	74	14/04/2012	235	114	24/05/2012	80
35	06/03/2012	130	75	15/04/2012	100	115	25/05/2012	160
36	07/03/2012	205	76	16/04/2012	175	116	26/05/2012	150
37	08/03/2012	160	77	17/04/2012	185	117	27/05/2012	225
38	09/03/2012	185	78	18/04/2012	205	118	28/05/2012	135
39	10/03/2012	120	79	19/04/2012	150	119	29/05/2012	135
40	11/03/2012	165	80	20/04/2012	230	120	30/05/2012	130

Tabla A1.8 – Duración actividad quemada.

## Actividad N°9: Ventilación y chequeo de gases

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	30	41	12/03/2012	30	81	21/04/2012	45
2	02/02/2012	40	42	13/03/2012	10	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	35	43	14/03/2012	35	83	23/04/2012	15
4	04/02/2012	20	44	15/03/2012	15	84	24/04/2012	25
5	05/02/2012	30	45	16/03/2012	15	85	25/04/2012	25
6	06/02/2012	35	46	17/03/2012	35	86	26/04/2012	25
7	07/02/2012	25	47	18/03/2012	25	87	27/04/2012	25
8	08/02/2012	20	48	19/03/2012	15	88	28/04/2012	30
9	09/02/2012	20	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	25
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	15	90	30/04/2012	20
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	30	91	01/05/2012	10
12	12/02/2012	30	52	23/03/2012	30	92	02/05/2012	35
13	13/02/2012	20	53	24/03/2012	10	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	20	94	04/05/2012	20
15	15/02/2012	45	55	26/03/2012	40	95	05/05/2012	30
16	16/02/2012	10	56	27/03/2012	30	96	06/05/2012	15
17	17/02/2012	20	57	28/03/2012	20	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	20	58	29/03/2012	20	98	08/05/2012	15
19	19/02/2012	30	59	30/03/2012	40	99	09/05/2012	30
20	20/02/2012	20	60	31/03/2012	30	100	10/05/2012	40
21	21/02/2012	25	61	01/04/2012	35	101	11/05/2012	20
22	22/02/2012	25	62	02/04/2012	40	102	12/05/2012	45
23	23/02/2012	30	63	03/04/2012	25	103	13/05/2012	35
24	24/02/2012	30	64	04/04/2012	30	104	14/05/2012	25
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	20	105	15/05/2012	20
26	26/02/2012	20	66	06/04/2012	15	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	40	67	07/04/2012	40	107	17/05/2012	25
28	28/02/2012	20	68	08/04/2012	15	108	18/05/2012	20
29	29/02/2012	20	69	09/04/2012	20	109	19/05/2012	25
30	01/03/2012	20	70	10/04/2012	20	110	20/05/2012	15
31	02/03/2012	25	71	11/04/2012	15	111	21/05/2012	35
32	03/03/2012	15	72	12/04/2012	10	112	22/05/2012	25
33	04/03/2012	25	73	13/04/2012	30	113	23/05/2012	25
34	05/03/2012	25	74	14/04/2012	25	114	24/05/2012	15
35	06/03/2012	25	75	15/04/2012	20	115	25/05/2012	30
36	07/03/2012	25	76	16/04/2012	25	116	26/05/2012	25
37	08/03/2012	45	77	17/04/2012	35	117	27/05/2012	10
38	09/03/2012	20	78	18/04/2012	20	118	28/05/2012	40
39	10/03/2012	20	79	19/04/2012	40	119	29/05/2012	40
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	40	120	30/05/2012	35

Tabla A1.9 – Duración actividad ventilación y chequeo de gases.

## Actividad N°10: Regada de marina y drenaje

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	30	41	12/03/2012	25	81	21/04/2012	25
2	02/02/2012	25	42	13/03/2012	35	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	20	43	14/03/2012	20	83	23/04/2012	15
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	20	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	30	45	16/03/2012	25	85	25/04/2012	25
6	06/02/2012	15	46	17/03/2012	30	86	26/04/2012	30
7	07/02/2012	10	47	18/03/2012	20	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	30	48	19/03/2012	20	88	28/04/2012	10
9	09/02/2012	10	49	20/03/2012	25	89	29/04/2012	35
10	10/02/2012	20	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	20
11	11/02/2012	35	51	22/03/2012	20	91	01/05/2012	35
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	35	92	02/05/2012	25
13	13/02/2012	20	53	24/03/2012	20	93	03/05/2012	25
14	14/02/2012	30	54	25/03/2012	15	94	04/05/2012	15
15	15/02/2012	10	55	26/03/2012	30	95	05/05/2012	30
16	16/02/2012	30	56	27/03/2012	25	96	06/05/2012	15
17	17/02/2012	45	57	28/03/2012	30	97	07/05/2012	30
18	18/02/2012	15	58	29/03/2012	15	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	15	59	30/03/2012	30	99	09/05/2012	20
20	20/02/2012	25	60	31/03/2012	15	100	10/05/2012	30
21	21/02/2012	15	61	01/04/2012	50	101	11/05/2012	30
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	45	102	12/05/2012	35
23	23/02/2012	40	63	03/04/2012	25	103	13/05/2012	20
24	24/02/2012	40	64	04/04/2012	30	104	14/05/2012	25
25	25/02/2012	10	65	05/04/2012	30	105	15/05/2012	45
26	26/02/2012	20	66	06/04/2012	45	106	16/05/2012	30
27	27/02/2012	35	67	07/04/2012	10	107	17/05/2012	15
28	28/02/2012	35	68	08/04/2012	35	108	18/05/2012	10
29	29/02/2012	45	69	09/04/2012	35	109	19/05/2012	20
30	01/03/2012	20	70	10/04/2012	25	110	20/05/2012	15
31	02/03/2012	15	71	11/04/2012	20	111	21/05/2012	35
32	03/03/2012	15	72	12/04/2012	40	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	40	73	13/04/2012	35	113	23/05/2012	30
34	05/03/2012	25	74	14/04/2012	45	114	24/05/2012	40
35	06/03/2012	35	75	15/04/2012	20	115	25/05/2012	30
36	07/03/2012	35	76	16/04/2012	45	116	26/05/2012	20
37	08/03/2012	20	77	17/04/2012	15	117	27/05/2012	35
38	09/03/2012	25	78	18/04/2012	20	118	28/05/2012	25
39	10/03/2012	15	79	19/04/2012	30	119	29/05/2012	10
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	20	120	30/05/2012	35

Tabla A1.10 – Duración actividad regada de marina y drenaje.

## Actividad N°11: Retiro de marina

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	250	41	12/03/2012	285	81	21/04/2012	260
2	02/02/2012	245	42	13/03/2012	205	82	22/04/2012	205
3	03/02/2012	245	43	14/03/2012	250	83	23/04/2012	210
4	04/02/2012	175	44	15/03/2012	255	84	24/04/2012	305
5	05/02/2012	280	45	16/03/2012	200	85	25/04/2012	290
6	06/02/2012	240	46	17/03/2012	180	86	26/04/2012	200
7	07/02/2012	250	47	18/03/2012	255	87	27/04/2012	250
8	08/02/2012	240	48	19/03/2012	220	88	28/04/2012	285
9	09/02/2012	280	49	20/03/2012	185	89	29/04/2012	290
10	10/02/2012	200	50	21/03/2012	270	90	30/04/2012	270
11	11/02/2012	230	51	22/03/2012	250	91	01/05/2012	270
12	12/02/2012	225	52	23/03/2012	185	92	02/05/2012	235
13	13/02/2012	275	53	24/03/2012	300	93	03/05/2012	235
14	14/02/2012	235	54	25/03/2012	300	94	04/05/2012	265
15	15/02/2012	200	55	26/03/2012	205	95	05/05/2012	185
16	16/02/2012	235	56	27/03/2012	240	96	06/05/2012	260
17	17/02/2012	245	57	28/03/2012	245	97	07/05/2012	215
18	18/02/2012	225	58	29/03/2012	240	98	08/05/2012	180
19	19/02/2012	230	59	30/03/2012	310	99	09/05/2012	225
20	20/02/2012	260	60	31/03/2012	185	100	10/05/2012	235
21	21/02/2012	255	61	01/04/2012	260	101	11/05/2012	300
22	22/02/2012	255	62	02/04/2012	245	102	12/05/2012	245
23	23/02/2012	310	63	03/04/2012	165	103	13/05/2012	245
24	24/02/2012	245	64	04/04/2012	165	104	14/05/2012	230
25	25/02/2012	240	65	05/04/2012	230	105	15/05/2012	270
26	26/02/2012	190	66	06/04/2012	235	106	16/05/2012	170
27	27/02/2012	270	67	07/04/2012	175	107	17/05/2012	190
28	28/02/2012	295	68	08/04/2012	230	108	18/05/2012	270
29	29/02/2012	260	69	09/04/2012	210	109	19/05/2012	290
30	01/03/2012	285	70	10/04/2012	300	110	20/05/2012	200
31	02/03/2012	240	71	11/04/2012	275	111	21/05/2012	245
32	03/03/2012	205	72	12/04/2012	235	112	22/05/2012	205
33	04/03/2012	270	73	13/04/2012	225	113	23/05/2012	245
34	05/03/2012	280	74	14/04/2012	255	114	24/05/2012	200
35	06/03/2012	240	75	15/04/2012	200	115	25/05/2012	250
36	07/03/2012	305	76	16/04/2012	245	116	26/05/2012	200
37	08/03/2012	275	77	17/04/2012	295	117	27/05/2012	255
38	09/03/2012	225	78	18/04/2012	295	118	28/05/2012	240
39	10/03/2012	235	79	19/04/2012	265	119	29/05/2012	240
40	11/03/2012	285	80	20/04/2012	250	120	30/05/2012	250

Tabla A1.11 – Duración actividad retiro de marina.

## Actividad N°12: Acuñaadura

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	55	41	12/03/2012	45	81	21/04/2012	35
2	02/02/2012	65	42	13/03/2012	65	82	22/04/2012	70
3	03/02/2012	50	43	14/03/2012	25	83	23/04/2012	60
4	04/02/2012	55	44	15/03/2012	30	84	24/04/2012	70
5	05/02/2012	30	45	16/03/2012	30	85	25/04/2012	35
6	06/02/2012	20	46	17/03/2012	45	86	26/04/2012	20
7	07/02/2012	15	47	18/03/2012	30	87	27/04/2012	65
8	08/02/2012	60	48	19/03/2012	40	88	28/04/2012	50
9	09/02/2012	35	49	20/03/2012	25	89	29/04/2012	45
10	10/02/2012	55	50	21/03/2012	50	90	30/04/2012	30
11	11/02/2012	30	51	22/03/2012	55	91	01/05/2012	50
12	12/02/2012	75	52	23/03/2012	55	92	02/05/2012	35
13	13/02/2012	45	53	24/03/2012	40	93	03/05/2012	65
14	14/02/2012	15	54	25/03/2012	40	94	04/05/2012	30
15	15/02/2012	40	55	26/03/2012	80	95	05/05/2012	30
16	16/02/2012	45	56	27/03/2012	35	96	06/05/2012	55
17	17/02/2012	40	57	28/03/2012	35	97	07/05/2012	50
18	18/02/2012	30	58	29/03/2012	20	98	08/05/2012	40
19	19/02/2012	35	59	30/03/2012	75	99	09/05/2012	25
20	20/02/2012	65	60	31/03/2012	40	100	10/05/2012	25
21	21/02/2012	70	61	01/04/2012	45	101	11/05/2012	20
22	22/02/2012	20	62	02/04/2012	45	102	12/05/2012	60
23	23/02/2012	35	63	03/04/2012	80	103	13/05/2012	40
24	24/02/2012	35	64	04/04/2012	25	104	14/05/2012	30
25	25/02/2012	45	65	05/04/2012	30	105	15/05/2012	60
26	26/02/2012	65	66	06/04/2012	45	106	16/05/2012	45
27	27/02/2012	35	67	07/04/2012	40	107	17/05/2012	55
28	28/02/2012	25	68	08/04/2012	70	108	18/05/2012	55
29	29/02/2012	40	69	09/04/2012	35	109	19/05/2012	25
30	01/03/2012	35	70	10/04/2012	35	110	20/05/2012	35
31	02/03/2012	50	71	11/04/2012	50	111	21/05/2012	65
32	03/03/2012	40	72	12/04/2012	25	112	22/05/2012	30
33	04/03/2012	30	73	13/04/2012	55	113	23/05/2012	60
34	05/03/2012	50	74	14/04/2012	75	114	24/05/2012	30
35	06/03/2012	35	75	15/04/2012	30	115	25/05/2012	45
36	07/03/2012	50	76	16/04/2012	50	116	26/05/2012	35
37	08/03/2012	35	77	17/04/2012	25	117	27/05/2012	20
38	09/03/2012	70	78	18/04/2012	65	118	28/05/2012	55
39	10/03/2012	35	79	19/04/2012	25	119	29/05/2012	65
40	11/03/2012	30	80	20/04/2012	45	120	30/05/2012	45

Tabla A1.12 – Duración actividad acuñadura.

## Actividad N°13: Marcación orificios

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	10	41	12/03/2012	5	81	21/04/2012	10
2	02/02/2012	10	42	13/03/2012	10	82	22/04/2012	10
3	03/02/2012	10	43	14/03/2012	15	83	23/04/2012	10
4	04/02/2012	10	44	15/03/2012	15	84	24/04/2012	10
5	05/02/2012	10	45	16/03/2012	10	85	25/04/2012	10
6	06/02/2012	10	46	17/03/2012	10	86	26/04/2012	10
7	07/02/2012	10	47	18/03/2012	10	87	27/04/2012	10
8	08/02/2012	10	48	19/03/2012	10	88	28/04/2012	5
9	09/02/2012	15	49	20/03/2012	10	89	29/04/2012	10
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	5	90	30/04/2012	10
11	11/02/2012	10	51	22/03/2012	15	91	01/05/2012	10
12	12/02/2012	10	52	23/03/2012	10	92	02/05/2012	5
13	13/02/2012	5	53	24/03/2012	10	93	03/05/2012	10
14	14/02/2012	10	54	25/03/2012	15	94	04/05/2012	10
15	15/02/2012	10	55	26/03/2012	10	95	05/05/2012	10
16	16/02/2012	10	56	27/03/2012	15	96	06/05/2012	10
17	17/02/2012	10	57	28/03/2012	10	97	07/05/2012	10
18	18/02/2012	10	58	29/03/2012	10	98	08/05/2012	10
19	19/02/2012	15	59	30/03/2012	10	99	09/05/2012	10
20	20/02/2012	10	60	31/03/2012	10	100	10/05/2012	10
21	21/02/2012	10	61	01/04/2012	5	101	11/05/2012	10
22	22/02/2012	10	62	02/04/2012	10	102	12/05/2012	10
23	23/02/2012	10	63	03/04/2012	15	103	13/05/2012	5
24	24/02/2012	15	64	04/04/2012	15	104	14/05/2012	10
25	25/02/2012	5	65	05/04/2012	5	105	15/05/2012	10
26	26/02/2012	10	66	06/04/2012	10	106	16/05/2012	10
27	27/02/2012	10	67	07/04/2012	5	107	17/05/2012	10
28	28/02/2012	15	68	08/04/2012	10	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	10	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	10
30	01/03/2012	10	70	10/04/2012	5	110	20/05/2012	10
31	02/03/2012	10	71	11/04/2012	10	111	21/05/2012	10
32	03/03/2012	5	72	12/04/2012	15	112	22/05/2012	10
33	04/03/2012	10	73	13/04/2012	10	113	23/05/2012	10
34	05/03/2012	5	74	14/04/2012	10	114	24/05/2012	10
35	06/03/2012	10	75	15/04/2012	10	115	25/05/2012	10
36	07/03/2012	10	76	16/04/2012	10	116	26/05/2012	10
37	08/03/2012	10	77	17/04/2012	10	117	27/05/2012	5
38	09/03/2012	10	78	18/04/2012	10	118	28/05/2012	10
39	10/03/2012	10	79	19/04/2012	10	119	29/05/2012	10
40	11/03/2012	10	80	20/04/2012	10	120	30/05/2012	10

Tabla A1.13 – Duración actividad marcación de orificios.

## Actividad N°14: Instalación equipo perforación 2

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	25	41	12/03/2012	15	81	21/04/2012	20
2	02/02/2012	15	42	13/03/2012	20	82	22/04/2012	15
3	03/02/2012	20	43	14/03/2012	15	83	23/04/2012	15
4	04/02/2012	20	44	15/03/2012	10	84	24/04/2012	15
5	05/02/2012	20	45	16/03/2012	15	85	25/04/2012	15
6	06/02/2012	20	46	17/03/2012	25	86	26/04/2012	20
7	07/02/2012	10	47	18/03/2012	20	87	27/04/2012	20
8	08/02/2012	15	48	19/03/2012	15	88	28/04/2012	20
9	09/02/2012	25	49	20/03/2012	20	89	29/04/2012	15
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	20	90	30/04/2012	25
11	11/02/2012	15	51	22/03/2012	20	91	01/05/2012	20
12	12/02/2012	15	52	23/03/2012	20	92	02/05/2012	20
13	13/02/2012	15	53	24/03/2012	20	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	15	94	04/05/2012	15
15	15/02/2012	15	55	26/03/2012	20	95	05/05/2012	15
16	16/02/2012	15	56	27/03/2012	15	96	06/05/2012	15
17	17/02/2012	15	57	28/03/2012	15	97	07/05/2012	15
18	18/02/2012	20	58	29/03/2012	15	98	08/05/2012	20
19	19/02/2012	20	59	30/03/2012	20	99	09/05/2012	15
20	20/02/2012	20	60	31/03/2012	15	100	10/05/2012	20
21	21/02/2012	15	61	01/04/2012	15	101	11/05/2012	15
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	15	102	12/05/2012	15
23	23/02/2012	15	63	03/04/2012	15	103	13/05/2012	20
24	24/02/2012	20	64	04/04/2012	20	104	14/05/2012	10
25	25/02/2012	15	65	05/04/2012	20	105	15/05/2012	15
26	26/02/2012	20	66	06/04/2012	15	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	25	67	07/04/2012	15	107	17/05/2012	20
28	28/02/2012	15	68	08/04/2012	20	108	18/05/2012	10
29	29/02/2012	15	69	09/04/2012	15	109	19/05/2012	20
30	01/03/2012	10	70	10/04/2012	15	110	20/05/2012	15
31	02/03/2012	20	71	11/04/2012	25	111	21/05/2012	15
32	03/03/2012	25	72	12/04/2012	20	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	20	73	13/04/2012	15	113	23/05/2012	20
34	05/03/2012	15	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	25
35	06/03/2012	15	75	15/04/2012	25	115	25/05/2012	15
36	07/03/2012	15	76	16/04/2012	15	116	26/05/2012	20
37	08/03/2012	20	77	17/04/2012	10	117	27/05/2012	15
38	09/03/2012	20	78	18/04/2012	20	118	28/05/2012	15
39	10/03/2012	10	79	19/04/2012	25	119	29/05/2012	20
40	11/03/2012	20	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	15

Tabla A1.14 – Duración actividad instalación equipo de perforación 2.

## Actividad N°15: Perforación de orificios

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	25	41	12/03/2012	30	81	21/04/2012	30
2	02/02/2012	25	42	13/03/2012	45	82	22/04/2012	40
3	03/02/2012	45	43	14/03/2012	30	83	23/04/2012	45
4	04/02/2012	35	44	15/03/2012	35	84	24/04/2012	35
5	05/02/2012	45	45	16/03/2012	35	85	25/04/2012	35
6	06/02/2012	40	46	17/03/2012	45	86	26/04/2012	50
7	07/02/2012	50	47	18/03/2012	50	87	27/04/2012	35
8	08/02/2012	30	48	19/03/2012	35	88	28/04/2012	35
9	09/02/2012	50	49	20/03/2012	30	89	29/04/2012	35
10	10/02/2012	30	50	21/03/2012	40	90	30/04/2012	50
11	11/02/2012	30	51	22/03/2012	30	91	01/05/2012	50
12	12/02/2012	35	52	23/03/2012	35	92	02/05/2012	50
13	13/02/2012	30	53	24/03/2012	40	93	03/05/2012	40
14	14/02/2012	55	54	25/03/2012	45	94	04/05/2012	35
15	15/02/2012	30	55	26/03/2012	20	95	05/05/2012	30
16	16/02/2012	30	56	27/03/2012	45	96	06/05/2012	50
17	17/02/2012	30	57	28/03/2012	50	97	07/05/2012	40
18	18/02/2012	30	58	29/03/2012	40	98	08/05/2012	30
19	19/02/2012	30	59	30/03/2012	60	99	09/05/2012	30
20	20/02/2012	45	60	31/03/2012	45	100	10/05/2012	45
21	21/02/2012	35	61	01/04/2012	30	101	11/05/2012	55
22	22/02/2012	35	62	02/04/2012	45	102	12/05/2012	25
23	23/02/2012	40	63	03/04/2012	30	103	13/05/2012	55
24	24/02/2012	30	64	04/04/2012	30	104	14/05/2012	40
25	25/02/2012	25	65	05/04/2012	25	105	15/05/2012	35
26	26/02/2012	35	66	06/04/2012	40	106	16/05/2012	30
27	27/02/2012	30	67	07/04/2012	35	107	17/05/2012	30
28	28/02/2012	30	68	08/04/2012	25	108	18/05/2012	30
29	29/02/2012	30	69	09/04/2012	35	109	19/05/2012	35
30	01/03/2012	30	70	10/04/2012	25	110	20/05/2012	50
31	02/03/2012	35	71	11/04/2012	30	111	21/05/2012	35
32	03/03/2012	30	72	12/04/2012	30	112	22/05/2012	45
33	04/03/2012	30	73	13/04/2012	40	113	23/05/2012	40
34	05/03/2012	35	74	14/04/2012	40	114	24/05/2012	30
35	06/03/2012	45	75	15/04/2012	40	115	25/05/2012	35
36	07/03/2012	40	76	16/04/2012	30	116	26/05/2012	30
37	08/03/2012	45	77	17/04/2012	35	117	27/05/2012	30
38	09/03/2012	30	78	18/04/2012	30	118	28/05/2012	40
39	10/03/2012	25	79	19/04/2012	30	119	29/05/2012	25
40	11/03/2012	30	80	20/04/2012	30	120	30/05/2012	40

Tabla A1.15 – Duración actividad perforación de orificios.

## Actividad N°16: Colocación de pernos

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	220	41	12/03/2012	190	81	21/04/2012	170
2	02/02/2012	240	42	13/03/2012	230	82	22/04/2012	160
3	03/02/2012	250	43	14/03/2012	210	83	23/04/2012	230
4	04/02/2012	190	44	15/03/2012	210	84	24/04/2012	190
5	05/02/2012	210	45	16/03/2012	225	85	25/04/2012	235
6	06/02/2012	200	46	17/03/2012	190	86	26/04/2012	240
7	07/02/2012	215	47	18/03/2012	185	87	27/04/2012	275
8	08/02/2012	210	48	19/03/2012	220	88	28/04/2012	190
9	09/02/2012	270	49	20/03/2012	215	89	29/04/2012	185
10	10/02/2012	240	50	21/03/2012	210	90	30/04/2012	205
11	11/02/2012	200	51	22/03/2012	155	91	01/05/2012	225
12	12/02/2012	205	52	23/03/2012	205	92	02/05/2012	170
13	13/02/2012	210	53	24/03/2012	175	93	03/05/2012	185
14	14/02/2012	230	54	25/03/2012	175	94	04/05/2012	170
15	15/02/2012	240	55	26/03/2012	280	95	05/05/2012	175
16	16/02/2012	235	56	27/03/2012	290	96	06/05/2012	200
17	17/02/2012	205	57	28/03/2012	205	97	07/05/2012	195
18	18/02/2012	140	58	29/03/2012	175	98	08/05/2012	150
19	19/02/2012	175	59	30/03/2012	285	99	09/05/2012	255
20	20/02/2012	170	60	31/03/2012	150	100	10/05/2012	240
21	21/02/2012	225	61	01/04/2012	250	101	11/05/2012	210
22	22/02/2012	220	62	02/04/2012	190	102	12/05/2012	240
23	23/02/2012	175	63	03/04/2012	165	103	13/05/2012	225
24	24/02/2012	185	64	04/04/2012	220	104	14/05/2012	235
25	25/02/2012	215	65	05/04/2012	185	105	15/05/2012	220
26	26/02/2012	190	66	06/04/2012	180	106	16/05/2012	175
27	27/02/2012	280	67	07/04/2012	230	107	17/05/2012	200
28	28/02/2012	185	68	08/04/2012	245	108	18/05/2012	190
29	29/02/2012	220	69	09/04/2012	235	109	19/05/2012	215
30	01/03/2012	255	70	10/04/2012	280	110	20/05/2012	230
31	02/03/2012	195	71	11/04/2012	265	111	21/05/2012	230
32	03/03/2012	270	72	12/04/2012	280	112	22/05/2012	170
33	04/03/2012	150	73	13/04/2012	185	113	23/05/2012	220
34	05/03/2012	220	74	14/04/2012	235	114	24/05/2012	205
35	06/03/2012	215	75	15/04/2012	275	115	25/05/2012	230
36	07/03/2012	270	76	16/04/2012	215	116	26/05/2012	270
37	08/03/2012	230	77	17/04/2012	275	117	27/05/2012	195
38	09/03/2012	255	78	18/04/2012	195	118	28/05/2012	220
39	10/03/2012	255	79	19/04/2012	230	119	29/05/2012	240
40	11/03/2012	240	80	20/04/2012	165	120	30/05/2012	185

Tabla A1.16 – Duración actividad colocación de pernos.

## Actividad N°17: Retiro equipo de perforación 2

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	25	41	12/03/2012	15	81	21/04/2012	20
2	02/02/2012	20	42	13/03/2012	15	82	22/04/2012	20
3	03/02/2012	15	43	14/03/2012	25	83	23/04/2012	15
4	04/02/2012	15	44	15/03/2012	15	84	24/04/2012	20
5	05/02/2012	20	45	16/03/2012	25	85	25/04/2012	10
6	06/02/2012	15	46	17/03/2012	15	86	26/04/2012	20
7	07/02/2012	20	47	18/03/2012	20	87	27/04/2012	15
8	08/02/2012	20	48	19/03/2012	30	88	28/04/2012	10
9	09/02/2012	20	49	20/03/2012	15	89	29/04/2012	20
10	10/02/2012	15	50	21/03/2012	25	90	30/04/2012	15
11	11/02/2012	20	51	22/03/2012	25	91	01/05/2012	25
12	12/02/2012	25	52	23/03/2012	15	92	02/05/2012	25
13	13/02/2012	15	53	24/03/2012	15	93	03/05/2012	15
14	14/02/2012	20	54	25/03/2012	10	94	04/05/2012	20
15	15/02/2012	20	55	26/03/2012	15	95	05/05/2012	15
16	16/02/2012	15	56	27/03/2012	20	96	06/05/2012	15
17	17/02/2012	20	57	28/03/2012	20	97	07/05/2012	20
18	18/02/2012	15	58	29/03/2012	10	98	08/05/2012	15
19	19/02/2012	25	59	30/03/2012	15	99	09/05/2012	20
20	20/02/2012	20	60	31/03/2012	10	100	10/05/2012	20
21	21/02/2012	25	61	01/04/2012	20	101	11/05/2012	20
22	22/02/2012	15	62	02/04/2012	20	102	12/05/2012	15
23	23/02/2012	25	63	03/04/2012	25	103	13/05/2012	25
24	24/02/2012	15	64	04/04/2012	15	104	14/05/2012	15
25	25/02/2012	20	65	05/04/2012	20	105	15/05/2012	25
26	26/02/2012	15	66	06/04/2012	20	106	16/05/2012	15
27	27/02/2012	25	67	07/04/2012	10	107	17/05/2012	20
28	28/02/2012	15	68	08/04/2012	30	108	18/05/2012	15
29	29/02/2012	15	69	09/04/2012	20	109	19/05/2012	20
30	01/03/2012	15	70	10/04/2012	20	110	20/05/2012	15
31	02/03/2012	25	71	11/04/2012	15	111	21/05/2012	20
32	03/03/2012	15	72	12/04/2012	25	112	22/05/2012	15
33	04/03/2012	25	73	13/04/2012	20	113	23/05/2012	20
34	05/03/2012	15	74	14/04/2012	20	114	24/05/2012	20
35	06/03/2012	20	75	15/04/2012	25	115	25/05/2012	25
36	07/03/2012	15	76	16/04/2012	20	116	26/05/2012	15
37	08/03/2012	20	77	17/04/2012	15	117	27/05/2012	25
38	09/03/2012	15	78	18/04/2012	10	118	28/05/2012	25
39	10/03/2012	25	79	19/04/2012	25	119	29/05/2012	15
40	11/03/2012	15	80	20/04/2012	15	120	30/05/2012	15

Tabla A1.17 – Duración actividad retiro equipo de perforación 2.

## Actividad N°18: Colocación de malla

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	130	41	12/03/2012	90	81	21/04/2012	75
2	02/02/2012	145	42	13/03/2012	115	82	22/04/2012	205
3	03/02/2012	190	43	14/03/2012	150	83	23/04/2012	135
4	04/02/2012	160	44	15/03/2012	170	84	24/04/2012	155
5	05/02/2012	80	45	16/03/2012	145	85	25/04/2012	135
6	06/02/2012	105	46	17/03/2012	170	86	26/04/2012	160
7	07/02/2012	160	47	18/03/2012	50	87	27/04/2012	150
8	08/02/2012	125	48	19/03/2012	125	88	28/04/2012	105
9	09/02/2012	155	49	20/03/2012	135	89	29/04/2012	170
10	10/02/2012	100	50	21/03/2012	145	90	30/04/2012	155
11	11/02/2012	185	51	22/03/2012	120	91	01/05/2012	160
12	12/02/2012	85	52	23/03/2012	175	92	02/05/2012	220
13	13/02/2012	95	53	24/03/2012	165	93	03/05/2012	200
14	14/02/2012	205	54	25/03/2012	135	94	04/05/2012	120
15	15/02/2012	180	55	26/03/2012	70	95	05/05/2012	90
16	16/02/2012	185	56	27/03/2012	155	96	06/05/2012	165
17	17/02/2012	175	57	28/03/2012	175	97	07/05/2012	165
18	18/02/2012	105	58	29/03/2012	115	98	08/05/2012	160
19	19/02/2012	195	59	30/03/2012	145	99	09/05/2012	145
20	20/02/2012	165	60	31/03/2012	225	100	10/05/2012	110
21	21/02/2012	185	61	01/04/2012	40	101	11/05/2012	175
22	22/02/2012	130	62	02/04/2012	205	102	12/05/2012	125
23	23/02/2012	95	63	03/04/2012	145	103	13/05/2012	120
24	24/02/2012	190	64	04/04/2012	160	104	14/05/2012	180
25	25/02/2012	95	65	05/04/2012	165	105	15/05/2012	100
26	26/02/2012	115	66	06/04/2012	150	106	16/05/2012	105
27	27/02/2012	115	67	07/04/2012	145	107	17/05/2012	145
28	28/02/2012	85	68	08/04/2012	165	108	18/05/2012	160
29	29/02/2012	145	69	09/04/2012	105	109	19/05/2012	165
30	01/03/2012	120	70	10/04/2012	75	110	20/05/2012	180
31	02/03/2012	140	71	11/04/2012	145	111	21/05/2012	160
32	03/03/2012	75	72	12/04/2012	80	112	22/05/2012	115
33	04/03/2012	170	73	13/04/2012	150	113	23/05/2012	70
34	05/03/2012	135	74	14/04/2012	160	114	24/05/2012	85
35	06/03/2012	45	75	15/04/2012	115	115	25/05/2012	80
36	07/03/2012	135	76	16/04/2012	185	116	26/05/2012	225
37	08/03/2012	185	77	17/04/2012	75	117	27/05/2012	95
38	09/03/2012	135	78	18/04/2012	115	118	28/05/2012	175
39	10/03/2012	55	79	19/04/2012	150	119	29/05/2012	115
40	11/03/2012	75	80	20/04/2012	180	120	30/05/2012	170

Tabla A1.18 – Duración actividad colocación de malla.

## Actividad N°19: Colocación de shotcrete

N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)	N°	FECHA	VALOR (min)
1	01/02/2012	100	41	12/03/2012	100	81	21/04/2012	90
2	02/02/2012	115	42	13/03/2012	140	82	22/04/2012	95
3	03/02/2012	145	43	14/03/2012	95	83	23/04/2012	90
4	04/02/2012	115	44	15/03/2012	130	84	24/04/2012	120
5	05/02/2012	160	45	16/03/2012	95	85	25/04/2012	100
6	06/02/2012	70	46	17/03/2012	95	86	26/04/2012	95
7	07/02/2012	125	47	18/03/2012	95	87	27/04/2012	85
8	08/02/2012	115	48	19/03/2012	105	88	28/04/2012	95
9	09/02/2012	95	49	20/03/2012	100	89	29/04/2012	80
10	10/02/2012	120	50	21/03/2012	105	90	30/04/2012	100
11	11/02/2012	80	51	22/03/2012	125	91	01/05/2012	125
12	12/02/2012	85	52	23/03/2012	90	92	02/05/2012	115
13	13/02/2012	75	53	24/03/2012	100	93	03/05/2012	100
14	14/02/2012	145	54	25/03/2012	150	94	04/05/2012	120
15	15/02/2012	145	55	26/03/2012	100	95	05/05/2012	130
16	16/02/2012	140	56	27/03/2012	80	96	06/05/2012	105
17	17/02/2012	95	57	28/03/2012	95	97	07/05/2012	105
18	18/02/2012	155	58	29/03/2012	105	98	08/05/2012	145
19	19/02/2012	135	59	30/03/2012	85	99	09/05/2012	85
20	20/02/2012	110	60	31/03/2012	150	100	10/05/2012	100
21	21/02/2012	95	61	01/04/2012	85	101	11/05/2012	85
22	22/02/2012	75	62	02/04/2012	150	102	12/05/2012	100
23	23/02/2012	120	63	03/04/2012	140	103	13/05/2012	125
24	24/02/2012	90	64	04/04/2012	90	104	14/05/2012	145
25	25/02/2012	140	65	05/04/2012	110	105	15/05/2012	95
26	26/02/2012	145	66	06/04/2012	125	106	16/05/2012	105
27	27/02/2012	105	67	07/04/2012	165	107	17/05/2012	105
28	28/02/2012	95	68	08/04/2012	95	108	18/05/2012	90
29	29/02/2012	105	69	09/04/2012	90	109	19/05/2012	80
30	01/03/2012	135	70	10/04/2012	105	110	20/05/2012	120
31	02/03/2012	115	71	11/04/2012	110	111	21/05/2012	135
32	03/03/2012	120	72	12/04/2012	85	112	22/05/2012	155
33	04/03/2012	95	73	13/04/2012	155	113	23/05/2012	105
34	05/03/2012	85	74	14/04/2012	125	114	24/05/2012	90
35	06/03/2012	85	75	15/04/2012	110	115	25/05/2012	120
36	07/03/2012	115	76	16/04/2012	115	116	26/05/2012	95
37	08/03/2012	150	77	17/04/2012	70	117	27/05/2012	105
38	09/03/2012	145	78	18/04/2012	160	118	28/05/2012	115
39	10/03/2012	100	79	19/04/2012	165	119	29/05/2012	75
40	11/03/2012	120	80	20/04/2012	95	120	30/05/2012	95

Tabla A1.19 – Duración actividad colocación de shotcrete.

**ANEXO 2**  
**Fichas técnicas equipos**

Se adjuntan en CD ROM todas las fichas técnicas en formato pdf de los equipos con los que se realizó el presente trabajo de título, material adicional que complementa el estudio. Se encuentran separados en 3 carpetas: jumbos, dumper y scoop respectivamente.

**ANEXO 3**  
**Tipos de sistema de modelación**

Los sistemas y los modelos se pueden clasificar según criterios muy distintos. He aquí algunos:

1. Estáticos o Dinámicos:
  - a) *Estáticos*: Sistemas en los que no interviene el tiempo.
  - b) *Dinámicos*: Sistemas en los que sí interviene el tiempo.
2. Determinísticos o Estocásticos:
  - a) *Determinísticos*: No contienen variables aleatorias. Esto quiere decir que en todas las simulaciones, si no se modifica ninguna condición, se va a llegar al mismo resultado.
  - b) *Estocásticos*: Contienen una o más variables aleatorias.
3. Discretos o Continuos:
  - a) *Discretos*: Las variables cambian de estado en instantes concretos de tiempo.
  - b) *Continuos*: Las variables cambian de valor de forma continua.
4. Abiertos o Cerrados:
  - a) *Abiertos*: Tienen intercambios materiales o de información con el entorno.
  - b) *Cerrados*: No intercambian nada con el entorno. Podría decirse que no existe entorno.

**ANEXO 4**  
**Conceptos estadísticos de simulación**

## a) Medida de Dispersión:

Las medidas de dispersión ilustran sobre la manera como varían los datos observados alrededor de una medida de tendencia central, que generalmente es la media aritmética. Indican cómo están concentrados los datos alrededor del parámetro de centralización permiten comprar una información con otra y ayudan a verificar si determinadas medidas de tendencia central son o no significativas.

Entre las medidas de dispersión están: el rango, la varianza, la desviación estándar, el coeficiente de variación, etc.

En este trabajo de investigación se usa principalmente la varianza y la desviación estándar, por eso que se definirá tan solo esas dos medidas de dispersión.

## b) Varianza:

La varianza es una medida que cuantifica el grado de dispersión o de variación de los valores de una variable cuantitativa con respecto a su media aritmética.

La varianza calculada a partir de una muestra será denotada por  $S^2$ . Es un número real no negativo y tiene unidades de medición al cuadrado, por ejemplo,  $\$^2$ ,  $\text{km}^2$ , etc.

$$S^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

## c) Desviación estándar:

La desviación estándar calculada a partir de una muestra se denotará por  $S$ , viene expresada en las mismas unidades en las que vienen expresados los datos.

Definición: La desviación estándar es la raíz cuadrada positiva de la varianza.

$$S = \sqrt{S^2}$$

## d) Intervalo de confianza:

Un intervalo de confianza es un rango o intervalo de valores usados para estimar el verdadero valor del parámetro  $\theta$ , de la población, con cierta probabilidad específica de acierto.

La probabilidad de que el verdadero valor del parámetro se encuentre en el intervalo construido se denomina nivel de confianza.

El nivel de confianza se representa con  $1 - \alpha$  o en porcentaje  $(1 - \alpha) \times 100\%$ . Sus valores más utilizados son 0.95, 0.98, 0.99, entre otros.

La probabilidad de equivocarnos se llama nivel de significancia y se simboliza con  $\alpha$ . Generalmente se construyen intervalos con significancia del 1%, 5%, 10%, etc.

Para construir un intervalo de confianza, se puede comprobar que la distribución Normal Estándar cumple:

$$P(-1.96 < z < 1.96) = 0.95$$

Lo anterior se puede comprobar con una tabla de probabilidades o un programa computacional que calcule probabilidades normales.

Luego, si una variable  $X$  tiene distribución  $N(\mu, \sigma^2)$ , entonces el 95% de las veces se cumple:

$$-1.96 \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \sqrt{n} \leq 1.96$$

Despejando  $\mu$  en la ecuación se tiene:

$$\bar{X} - 1.96x \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96x \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

El resultado es un intervalo que incluye al  $\mu$  el 95% de las veces. Es decir, es un intervalo de confianza al 95% para la media  $\mu$  cuando la variable  $X$  es normal y  $\sigma^2$  es conocido.

#### d.1) Intervalo de confianza para la media $\mu$

Por lo general, cuando se quiere construir un intervalo de confianza para la media poblacional  $\mu$ , la varianza poblacional  $\sigma^2$  es desconocida, por lo que el intervalo para  $\mu$  construido anteriormente es poco práctico.

Si en el intervalo se reemplaza la desviación estándar poblacional  $\sigma$  por la desviación estándar muestral  $S$ , el intervalo de confianza toma la forma:

$$\bar{X} - 1.96x \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + 1.96x \frac{S}{\sqrt{n}}$$

La cual es una buena aproximación para el intervalo de confianza de 95% para  $\mu$  con  $\sigma^2$  desconocido. Esta aproximación es mejor en la medida que el tamaño muestral sea grande.

Cuando el tamaño muestral es pequeño, el intervalo de confianza requiere utilizar la distribución  $t$  de Student (con  $n-1$  grados de libertad, siendo  $n$  el tamaño de la muestra), en vez de la distribución normal. (Por ejemplo, para un intervalo de 95% de confianza, los límites del intervalo ya no serán construidos usando el valor 1.96).

#### e) Prueba de Hipótesis:

Son métodos que se usan para tomar decisiones sobre poblaciones, a partir de los resultados de una muestra aleatoria escogida de esa población. Para llegar a tomar decisiones estadísticas se debe partir de afirmaciones o conjeturas con respecto a la población en la que se está interesado. Tales suposiciones pueden ser verdaderas o no. Una conjetura hecha sobre una

población o sobre sus parámetros deberá ser sometida a comprobación experimental con el propósito de saber si los resultados de una muestra aleatoria extraída de esa población, contradicen o no tal conjetura.

e.1) Hipótesis estadísticas:

Se denomina hipótesis estadística a cualquier afirmación o conjetura que se hace acerca de la distribución de una o más poblaciones.

La afirmación o conjetura puede referirse bien a la forma o tipo de distribución de probabilidad de la población o bien referirse al valor o valores de uno o más parámetros de la distribución.

e.2) Hipótesis simple y compuesta:

Se denomina hipótesis simple a cualquier hipótesis estadística que especifica completamente la distribución de la población, es decir, especifica la forma de la distribución y el valor de sus parámetros.

Si una hipótesis no especifica completamente la distribución de la población se dice que es una hipótesis compuesta.

e.3) Hipótesis nula y alternativa:

Se denomina hipótesis nula y se representa por  $H_0$ , a la hipótesis que es aceptada provisionalmente como verdadera y cuya validez será sometida a comprobación experimental. Los resultados experimentales nos permitirán seguir aceptándola como verdadera o si, por el contrario, debemos rechazarla como tal.

Toda hipótesis nula va acompañada de otra hipótesis alternativa.

Se denomina hipótesis alternativa y se representa por  $H_1$ , o por  $H_A$ , a la hipótesis que se acepta en caso de que la hipótesis nula  $H_0$  sea rechazada. La hipótesis alternativa  $H_1$ , es pues una suposición contraria a la hipótesis nula.

Por ejemplo, si se asume que  $\theta_0$  es un valor del parámetro desconocido  $\theta$  de una población cuya distribución se supone conocida, entonces son hipótesis nulas y alternativas las siguientes afirmaciones:

a)  $H_0: \theta = \theta_0$ , y  $H_1: \theta \neq \theta_0$

b)  $H_0: \theta \leq \theta_0$ , y  $H_1: \theta > \theta_0$

c)  $H_0: \theta \geq \theta_0$ , y  $H_1: \theta < \theta_0$

e.4) Prueba de una hipótesis estadística:

Para tomar decisiones estadísticas se requieren de ambas hipótesis (la nula y la alternativa).

La prueba de una hipótesis estadística es un proceso que nos conduce a tomar la decisión de aceptar o rechazar la hipótesis nula  $H_0$ , en contraposición de la hipótesis alternativa  $H_1$  y en base a los resultados de una muestra aleatoria seleccionada de la población en estudio.

La hipótesis nula  $H_0$  es la primera que se plantea y debe ser establecida de manera que especifique un valor  $\theta_0$  del parámetro  $\theta$  en estudio.

La aceptación de una hipótesis significa que los datos de la muestra no proporcionan evidencia suficiente para refutarla. El rechazo significa que los datos de la muestra lo refutan.

f) Prueba de bondad de ajuste:

Son pruebas de hipótesis que sirven para comprobar que la distribución generada puede aproximarse o no a una distribución teórica dada.

Las hipótesis que emplean estas pruebas son:

$H_0$ : La variable aleatoria se ajusta a la distribución candidata con los parámetros estimados.

$H_1$ : La variable aleatoria no se ajusta.

En todos los casos, se debe definir el nivel de significancia (0.05).

Las pruebas de hipótesis que se utilizarán en este trabajo de investigación son:

e) Prueba Kolmogorov Smirnov (KS)

ii) Prueba Chi cuadrado (Chi<sup>2</sup>)

*Prueba Kolmogorov Smirnov (KS):*

Esta prueba es aplicable sólo a variables aleatorias continuas, debido a que es un supuesto de la prueba.

No depende de una distribución específica y no se sabe a priori la distribución de donde se toman los datos.

Calcula diferencias (en valor absoluto) entre las frecuencias acumuladas observadas y las teóricas en cada clase.

Se busca la mayor diferencia ( $D_{\max}$ ) y se compara con el valor crítico de tabla KS.

Se puede aplicar para todo tipo de tamaño de muestras, ya sean pequeñas o grandes.

Otra ventaja es que permite construir límites de confianza para la distribución acumulada completa.

*Prueba Chi cuadrado ( $\text{Chi}^2$ ):*

Se usa para comprobar que no existe diferencia entre la distribución de frecuencias de la muestra y la distribución teórica.

Esta prueba nos permite determinar si las frecuencias observadas son suficientemente cercanas a las esperadas según nuestra hipótesis nula.

Válida para tamaños de muestra grande, para distribuciones discretas o continuas.

Intuitivamente: compara frecuencias observadas contra frecuencias teóricas o esperadas.

El estadístico hallado (medida de discrepancia) se compara con los valores de la tabla  $\text{Chi}^2$ .

g) Distribución triangular

Se dice que una variable aleatoria sigue una distribución triangular, si su función de densidad es de la forma:

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{2}{(b-a)(m-a)} (x-a) & a \leq x \leq m \\ \frac{2}{(b-a)(b-m)} (b-x) & m \leq x \leq b \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases}$$

Donde  $m$  es la moda o valor más probable.

**ANEXO 5**  
**Herramienta Input Analyzer**

El funcionamiento de la herramienta “Input Analyzer” es bastante sencillo, de acuerdo a los siguientes pasos:

- 1.-Se crea un archivo de tipo texto con la serie de datos a analizar.
- 2.- Se carga dicho archivo en el programa.
- 3.-Se ejecuta la opción “ajustar a todas las distribuciones”.
- 4.-Se visualiza el reporte para la distribución escogida.

**ANEXO 6**  
**Manual de Usuario del modelo de selección de equipos**

La finalidad de este trabajo como su título lo señala es evaluar un Modelo de Selección de Equipos para Desarrollo Rápido de Túneles, cuyo modelo se realizó con el software de simulación *Arena versión 10.00.00 CPR 7* (versión académica). El modelo es totalmente flexible para facilitar su uso al momento de solucionar distintos tipo de cálculos.

El modelo denominado *Modelo Tunel.doe* está confeccionado en base a 56 variables definidas por el usuario y 22 estadísticos de salida. A continuación se detallan en las siguientes tablas 6.1 y 6.2:

a) Variables del modelo:

N°	VARIABLE	UNIDAD	DESCRIPCION
1	LARGO	metros	Largo nominal disparo
2	ANCHO	metros	Ancho nominal sección
3	ALTO	metros	Alto nominal sección
4	RADIO	metros	Radio nominal sección
5	BOTADA	adimensional	Botada disparo 90%
6	PI	adimensional	Constante "pi"
7	PERLECH	adimensional	Pérdida lechada 50%
8	LONPERN	metros	Longitud pernos
9	DIAPERN	milímetros	Diámetro de pernos
10	DIAPERF	milímetros	Diámetro de perforación pernos
11	NUMPERN	unidad	Número de pernos
12	TFCOLPERN	minutos	Tiempos fijos colocación pernos
13	VELLECH	litros/minutos	Velocidad de lechadora
14	LONPLANC	metros	Longitud libre planchuela
15	POTJUMB	kilowatt	Potencia perforadora
16	DIATIRO	milímetros	Diámetro de tiros disparo
17	FACTORK	adimensional	Factor Roca: 1,0 competente, 1,2 medianamente competente, 1,3 incompetente
18	NUMTIRO	unidad	Número de tiros disparo
19	NUMHUEC	unidad	Número de huecos
20	EFIBRA1	adimensional	Eficiencia brazo n°1
21	EFIBRA2	adimensional	Eficiencia brazo n°2
22	EFIBRA3	adimensional	Eficiencia brazo n°3
23	BRAJUM1	adimensional	Brazo N°1 (1=si,0=no)
24	BRAJUM2	adimensional	Brazo N°1 (1=si,0=no)
25	BRAJUM3	adimensional	Brazo N°1 (1=si,0=no)
26	NUMSPLIT	unidad	Número de split set
27	LARSPLIT	metros	Longitud de split set
28	TIEMPMAR	segundos	Tiempo marcación por tiro
29	RECHSHOT	adimensional	Rechazo shotcrete 87,5%
30	ESPCAPA	metros	Espesor capa de shotcrete

31	TFCOLSHOT	minutos	Tiempos fijos colocación shotcrete
32	RENDSHOT	metros cúbicos/hora	Rendimiento shotcretera
33	DISTPERN	metros	Distancia entre pernos
34	ANCHMALL	metros	Ancho nominal malla fortificación
35	PERDTRAS	metros	Pérdida de malla por traslape
36	ESPONJMAT	adimensional	Esponjamiento marina
37	SOBREEXC	metros	Sobreexcavación perimetral
38	CAPBALD	yardas cúbicas	Capacidad volumétrica balde scoop
39	EFIBALD	adimensional	Eficiencia llenado balde scoop
40	DISTOLV	metros	Distancia a tolva dumper
41	VELPROMS	kilómetro/hora	Velocidad promedio scoop
42	CAPTOLV	metros cúbicos	Capacidad volumétrica tolva dumper
43	EFITOLV	adimensional	Eficiencia llenado tolva scoop
44	DISTACOP	metros	Distancia hacia acopio de botado
45	VELPROMD	kilómetro/hora	Velocidad promedio dumper
46	NDEDUMPER	unidad	N° de dumper
47	TVENTILA	minutos	Tiempo de ventilación
48	COSPOJUM	US\$/mes	Costo posesión mensual jumbo
49	COSPODUM	US\$/mes	Costo posesión mensual dumper
50	COSPOSSCO	US\$/mes	Costo posesión mensual scoop
51	TFCOLMALL	minutos	Tiempos fijos colocación malla
52	TFIJD	minutos	Tiempos fijos dumper
53	TFIJS	minutos	Tiempos fijos scoop
54	COSOPEJUM	(US\$/mpf)	Costo operación jumbo
55	COSOPEDUM	(US\$/hora)	Costo operación dumper
56	COSOPESCO	(US\$/hora)	Costo operación scoop

Tabla A6.1 - Variables del modelo computacional, fuente: elaboración propia.

## b) Estadísticos del modelo:

N°	ESTADÍSTICO	UNIDAD
1	AVANCE MENSUAL	ml/mes
2	DURACION MARCACION FREENTE	minutos
3	DURACION INSTALACION EQUIPO PERFORACION 1	minutos
4	DURACION PERFORACION FREENTE	minutos
5	DURACION RETIRO EQUIPO PERFORACION 1	minutos
6	DURACION INSTALACION EQUIPO CARGUIO	minutos
7	DURACION CARGUIO DE FREENTE	minutos
8	DURACION RETIRO EQUIPO CARGUIO	minutos
9	DURACION QUEMADA	minutos
10	DURACION VENTILACION Y CHEQUEO DE GASES	minutos
11	DURACION REGADA DE MARINA Y DRENAJE	minutos
12	DURACION RETIRO DE MARINA	minutos
13	DURACION ACUNADURA	minutos
14	DURACION MARCACION ORIFICIOS	minutos
15	DURACION INSTALACION EQUIPO PERFORACION 2	minutos
16	DURACION PERFORACION ORIFICIOS	minutos

17	DURACION COLOCACION DE PERNOS	minutos
18	DURACION RETIRO EQUIPO PERFORACION 2	minutos
19	DURACION COLOCACION DE MALLA	minutos
20	DURACION COLOCACION DE SHOTCRETE	minutos
21	COSTO UNITARIO	US\$/ml
22	COSTO TOTAL	US\$/mes

Tabla A6.2 - Estadísticos de salida del modelo computacional, fuente: elaboración propia.

Como configuración particular de este modelo se definieron los siguientes parámetros:

- Número de réplicas: 10
- Duración de la simulación: 30 días (equivalente a 1 mes)
- Unidad de tiempo base: minutos
- Horas por día: 24

El software Arena proporciona una herramienta llamada *Process Analyzer* con la cual el usuario deberá trabajar, esta herramienta consiste básicamente en generar diversos escenarios (combinaciones de variables), definir variables a utilizar, definir estadísticos de salida a analizar y finalmente ejecutarlo.

A continuación se detalla el paso a paso para poder operar con el modelo.

- 1.- Abrir archivo *Modelo Tunel.doe* a través del software Arena.
- 2.- Ir a *Run* luego *Setup* y definir los parámetros básicos del modelo (números de réplicas, duración de la simulación, etc.).
- 3.- Ir a *Run* luego *Go*, comenzará a ejecutarse el modelo.
- 4.- Con el modelo ejecutado se debe abrir el archivo *Modelo Seleccion.pan* a través de la herramienta *Process Analyzer*.
- 5.- Una vez cargado el modelo, se puede visualizar que existen 10 escenarios más un caso base (que corresponde al método tradicional). En estos momentos se pueden modificar los valores de las casillas de *Control* (variables del modelo).
- 6.- Ya definidos los valores se deben seleccionar todos los escenarios menos el caso base e ir a *Run* luego *Go* (en estos momentos el programa comenzará a ejecutarse).
- 7.- Cuando haya terminado generará *Responses* (estadísticos de salida).
- 8.- El programa arrojará los resultados con los cuales en una primera instancia se debe seleccionar de entre los 10 escenarios el óptimo de acuerdo al criterio de menor costo unitario por metro de avance.
- 9.- Una vez seleccionado el caso, se debe ir a *Run* luego *Reset* para restablecer los valores.

10.- A continuación se debe seleccionar el caso base y el caso elegido en el punto anterior e ir a *Run* luego *Go*.

11.- Ahora tenemos los 2 casos (método tradicional y método RMD), con lo cual podremos analizar los resultados.

12.- El programa además es capaz de graficar los distintos estadísticos de salida para cada variable o hacer comparación de escenarios.

**ANEXO 7**  
**Factor K según tipo de roca**

El modelo elaborado es aplicable a cualquier tipo de roca a excavar para eso se desarrolló un factor k, el cual está construido en base a la clasificación geo-mecánica de  $Q_{\text{barton}}$ , índice conocido como indicador de calidad de túnel, a continuación en tabla A7.1 se presentan sus valores:

Q BARTON	DESCRIPCION	TIPO DE ROCA
0,001 - 0,01	excepcionalmente mala	roca incompetente
0,01 - 0,1	extremadamente mala	
0,1 - 1,0	muy mala	
1 - 4	mala	
4 - 10	regular	medianamente competente
10 - 40	bueno	
40 - 100	muy buena	roca competente
100 - 400	extremadamente buena	
400 - 1000	excepcionalmente buena	

Tabla A7.1 – Tabla  $Q_{\text{barton}}$ , fuente: Barton (2000).

En función del tipo de roca se optó por un criterio constructivo conocido como factor de ajuste k, en el cual a medida que la calidad de la roca es menor, el factor aumenta. En tabla A7.2 se presentan sus valores:

TIPO DE ROCA	FACTOR K
roca competente	1
medianamente competente	1,2
roca incompetente	1,3

Tabla A7.2 – Tabla de factor k, fuente: División El Teniente, Codelco.

**APENDICE 1**  
**Distribución normal tipificada**

<b>z</b>	<b>0</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.03</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>0.06</b>	<b>0.07</b>	<b>0.08</b>	<b>0.09</b>
<b>0</b>	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
<b>0.1</b>	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
<b>0.2</b>	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
<b>0.3</b>	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
<b>0.4</b>	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
<b>0.5</b>	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
<b>0.6</b>	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
<b>0.7</b>	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
<b>0.8</b>	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
<b>0.9</b>	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
<b>1</b>	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
<b>1.1</b>	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
<b>1.2</b>	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
<b>1.3</b>	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
<b>1.4</b>	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
<b>1.5</b>	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
<b>1.6</b>	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
<b>1.7</b>	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
<b>1.8</b>	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
<b>1.9</b>	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
<b>2</b>	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
<b>2.1</b>	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
<b>2.2</b>	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
<b>2.3</b>	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
<b>2.4</b>	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
<b>2.5</b>	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
<b>2.6</b>	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
<b>2.7</b>	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
<b>2.8</b>	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
<b>2.9</b>	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
<b>3</b>	0.9987	0.9987	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989	0.9989	0.9990	0.9990
<b>3.1</b>	0.9990	0.9991	0.9991	0.9991	0.9992	0.9992	0.9992	0.9992	0.9993	0.9993
<b>3.2</b>	0.9993	0.9993	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9995	0.9995
<b>3.3</b>	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997
<b>3.4</b>	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998
<b>3.5</b>	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998	0.9998
<b>3.6</b>	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.7</b>	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.8</b>	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
<b>3.9</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
<b>4</b>	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Tabla AP1.1 – Tabla valores distribución Normal, fuente: Aplicaciones Estadísticas (1995).

**APENDICE 2**  
**Distribución T Student**

$\alpha/2$ gl	0,40	0,30	0,20	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,192	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,648	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,009	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	0,253	0,525	0,842	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,106	3,310
$\infty$	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291

Tabla AP2.1 – Tabla valores distribución T Student, fuente: Aplicaciones Estadísticas (1995).