



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

OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE TRONADURA EN FUNCIÓN DE EXPLOSIVOS
DE ALTA ENERGÍA EN SOCIEDAD CONTRACTUAL MINERA EL ABRA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ANDRÉS ALEJANDRO AGUIRRE GARCÍA

PROFESOR GUÍA:

PATRICIO BRACAMONTE PÉREZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

JORGE CUBILLOS MIRANDA

GONZALO MONTES ATENAS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Sociedad Contractual Minera El Abra

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de minas
POR: Andrés Alejandro Aguirre García
FECHA: 02/03/2016
PROFESOR GUÍA: Patricio Bracamonte Pérez

**OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS DE TRONADURA EN FUNCIÓN DE
EXPLOSIVOS DE ALTA ENERGÍA EN SOCIEDAD CONTRACTUAL MINERA EL
ABRA**

Dentro del proceso minero, se tiene que los costos operacionales alcanzan una relevancia significativa, por lo tanto, para reducir estos costos primero se deben visualizar los procesos involucrados a ellos. Se tiene que los procesos de perforación y tronadura son las primeras operaciones unitarias que resultan del diagrama de flujos en la extracción del material, implicando que un buen comienzo podría generar mejoras en los procesos posteriores.

En consecuencia, el presente trabajo busca encontrar la rentabilidad técnico-económica de aplicar explosivos de alta energía en la tronadura mediante análisis de fragmentación, análisis de pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, costos y rendimiento de chancador, con el objetivo de optimizar la operación mediante la reducción de costos y granulometría con el propósito de estandarizar la tronadura en un sector particular de la minera.

Se comienza con un análisis granulométrico tanto de propuestas simuladas como de pruebas en terreno mediante los software Split Desktop y Online, luego, a las distintas pruebas se les realiza análisis técnico-económico a partir de los distintos parámetros y configuraciones impuestas en cuanto a los diseños de la malla de tronadura y carguío de la malla, y en conjunto analizar la manera en que afectan al chancado en temas energéticos.

De los resultados obtenidos, se tiene que utilizando un explosivo de alta energía se logra un proceso exitoso en términos de optimización, ya que logra reducir la granulometría (P80), sin embargo, los costos del proceso de perforación y tronadura aumentan. Esto último se ve compensado en el flujo de caja, ya que se obtienen resultados más favorables en cuanto a las pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa las cuales se redujeron en sobremanera con la utilización del explosivo de alta energía, obteniéndose un balance global positivo en cuanto al uso de esta nueva alternativa.

Estas nuevas medidas incrementan la rentabilidad del proceso total de minería, ya que se traducen en beneficios posteriores a la tronadura en sí, logrando cumplir con los objetivos impuestos en un comienzo, por lo que la utilización de explosivos de alta energía contribuye en gran manera a mejorar la fragmentación y el rendimiento del chancador, y en consecuencia hacer rentable el negocio desde una visión global.

Abstract

BLASTING PARAMETER OPTIMIZATION BASED ON HIGH-ENERGY EXPLOSIVES IN SOCIEDAD CONTRACTUAL MINERA EL ABRA

In the mining process, it has that the operating costs achieve significant importance, therefore, to reduce these costs must first visualize the processes involved with them. It has that the drilling and blasting processes are the first unit operations resulting from the flowchart in extracting the material, implying that a good start could generate improved downstream processing.

Consequently, the present work seeks to find the technical and economic viability of applying high-energy explosive blasting through fragmentation analysis, losses by redirected loads by coarse fragmentation analysis, costs and performance crusher, with the aim of optimizing the operation by reducing costs and granulometry in order to standardize the blast in a particular sector of the mining.

It begins with an analysis of fragmentation both simulated proposals as field tests using the Split Desktop and Online software, then, to the various tests were carried out technical and economic analysis from the various parameters and settings imposed as for the designs mesh blasting and loading of the mesh, and together analyze how they affect the crusher in energetic issues.

From the results, it has that using a high-energy explosive a successful process is achieved in terms of optimization, because it manages to reduce the particle size (P80), however, the costs of drilling and blasting process increases. The latter is compensated in the cash flow, since more favorable results are obtained in terms of losses by redirected loads by coarse fragmentation which is greatly reduced with the use of high-energy explosive, giving an overall positive balance the use of this new alternative.

These new measures increase the profitability of the total mining process, and which result in further benefits to the blast itself, managing to meet the objectives set at the beginning, so the use of high-energy explosives contributes greatly to improve fragmentation and the performance of the crusher, and in consequence make profitable business from a global perspective.

Dedicatoria

A mi gran familia, amigos y al norte

Agradecimientos

Primero que todo, agradecer de todo corazón a mi familia, fueron el apoyo incondicional más grande que pude tener durante este proceso, en las buenas y en las malas. Paulina, Carolina, Nolfi y Andrés, nunca podré devolverles la crianza y los valores que me entregaron, siendo para mí un orgullo poder llamarlos hermana, madre y padre.

Agradecimientos a la familia Aguirre, con la cual conté siempre como un soporte, donde descubrí que el preocuparse por los demás es uno de los valores más potentes en la vida, muchas gracias primos, Carlos, Diego, Andrea, Alfonso, Alexis, Constanza, Sebastián, Alfredo, Nicolás, Camila, Marcelo, Valeria, Luis, Eduardo y Pia, y muchas gracias tíos, Addrina, Alejandrina, Abraham, Aroldo, Alfonso, Julio, Alfredo y Archivaldo, que me hubiera gustado que estuvieras con nosotros, y a mi abuelita Elsa, que aunque no logré sacar el título antes de tiempo, sé que estás conmigo. Un orgullo y satisfacción al continuar con la tradición minera de la familia, siendo un rubro hermoso pero sacrificado, donde el extrañar a sus seres queridos por la distancia es pan de cada día.

A la familia García, a pesar de la constante distancia no dejé de recibir su respaldo y aliento, y por esas sonrisas entregadas, primos, Yemima (y Paolo), Carolina, Fernanda, Iván, Areli, Vanesa, Sergio y Fernando, y también agradecer el apoyo de mis tíos, Omar, Nora (y Fernando Santos), Maudy (y Fernando Ahumada) y en especial a mis tíos Rolando y Manuel.

A mis compañeros de curso del colegio, les agradezco la constante alegría y cercanía que hasta el día de hoy mantenemos donde la distancia no ha sido relevante, un gran abrazo Javier, Francisco, Braulio, Pia, Carolina, Carlos Sanhueza, Carlos Sánchez, Hernán, Daniela, David y Anais.

A mis compañeros de universidad, cuantas aventuras hemos vivido, y sé que seguiremos manteniendo el contacto, Pablo Lara, Julio, Pietro, Pablo Morales y Daniel.

A mi polola Cati, que me ha apoyado y acompañado durante este proceso en este último año de universidad lleno de cambios en la vida.

Amigos de la vida, que agradezco que nuestros destinos se cruzaran, en especial a Rosa.

Al personal de SCM El Abra, Patricio, Rodrigo, Pablo, Francisco, Claudio, Angel, Alexis, Carlos y José, muchas gracias por la ayuda y guía entregada durante el proceso.

Al norte grande, al desierto y a esta tierra de sol y cobre que me vió crecer!

Kusiyqa sapa runamanta

Tabla de contenido

pág.

Capítulo 1: Introducción.....	17
1.1 Contexto.....	17
1.2 Objetivos.....	21
1.2.1 Propósito.....	21
1.2.2 Objetivo General.....	21
1.2.3 Objetivos Específicos.....	21
1.2.4 Objetivos Operacionales.....	21
1.3 Alcances.....	22
1.4 Limitaciones.....	23
1.5 Metodología de trabajo.....	24
1.6 Aspectos Generales.....	24
1.6.1 Descripción de la faena.....	24
1.6.2 Antecedentes del trabajo.....	27
1.6.3 Reseña Histórica.....	29
1.6.4 Aspectos fisiográficos.....	30
Capítulo 2: Revisión Bibliográfica.....	36
2.1 Operación de perforación y tronadura.....	36
2.1.1 Perforación.....	37
2.1.2 Tronadura.....	43
2.2 Explosivos.....	49
2.2.1 Agentes Explosivos Secos.....	50
2.2.2 Hidrogeles.....	58
2.2.3 Emulsiones.....	61
2.2.4 ANFO Pesado.....	64

2.2.5	Explosivos utilizados y por utilizar en la minera El Abra.....	68
2.3	Propiedades de los explosivos	77
2.3.1	Potencia y Energía.....	77
2.3.2	Velocidad de Detonación.....	77
2.3.3	Densidad.....	78
2.3.4	Presión de Detonación.....	79
2.3.5	Estabilidad.....	79
2.3.6	Resistencia al Agua.....	79
2.3.7	Sensibilidad.....	80
2.3.8	Transmisión de la detonación.....	80
2.3.9	Desensibilización.....	81
2.3.10	Resistencias a las bajas temperaturas.....	82
2.3.11	Humos.....	82
2.4	Fragmentación.....	82
2.4.1	Fórmula de Larsson.....	82
2.4.2	Fórmula de SVEDEFO (Swedish Detonic Research Foundation).....	85
2.4.3	Modelo KUZ-RAM.....	85
2.4.4	Modelos JK.....	89
Capítulo 3:	Materiales y métodos.....	90
3.1	Determinación de costos energéticos de chancador.....	93
3.2	Determinación de beneficio de tonelaje pasante chancador.....	95
3.3	Determinación de pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa.....	97
3.4	Determinación del P80.....	98
3.5	Análisis técnico-económico asociado a perforación y tronadura.....	101
Capítulo 4:	Resultados y Análisis.....	105

4.1	Resultados propuestas simuladas.....	105
4.2	Resultados Demoblast.....	127
4.2.1	Resultados pruebas tronadura caso histórico.....	127
4.2.2	Resultados Demoblast caso específico.....	129
4.3	Resultados rendimiento chancador.....	143
4.3.1	Resultados rendimiento chancador caso histórico.....	143
4.3.2	Resultados rendimiento chancador caso específico.....	145
4.4	Resultados pérdidas cargas redireccionadas por fragmentación gruesa.....	146
4.4.1	Resultados pérdidas cargas redireccionadas caso histórico.....	146
4.4.2	Resultados pérdidas cargas redireccionadas caso específico.....	147
4.5	Resultados Flujo de caja.....	147
4.5.1	Resultados Flujo de caja caso histórico.....	147
4.5.2	Resultados Flujo de caja caso específico.....	148
4.6	Análisis propuestas simuladas.....	149
4.7	Análisis Demoblast.....	151
4.7.1	Análisis pruebas tronadura caso histórico.....	151
4.7.2	Análisis Demoblast caso específico.....	152
4.8	Análisis rendimiento chancador.....	155
4.8.1	Análisis chancador caso histórico.....	155
4.8.2	Análisis chancador caso específico.....	156
4.9	Análisis pérdidas cargas redireccionadas por fragmentación gruesa.....	157
4.9.1	Análisis pérdidas cargas redireccionadas caso histórico.....	157
4.9.2	Análisis pérdidas cargas redireccionadas caso específico.....	158
4.10	Análisis Flujo de caja.....	159
4.10.1	Análisis Flujo de caja caso histórico.....	159

4.10.2 Análisis flujo de caja caso específico	160
Capítulo 5: Conclusiones.....	161
Capítulo 6: Bibliografía	164

Tablas

Tabla 1. Carta Gantt.....	24
Tabla 2. Alertas por tormentas de viento en SCM El Abra.....	33
Tabla 3. Solubilidad del NA dependiendo de la temperatura.....	52
Tabla 4. Temperatura en proceso de absorción de humedad.....	52
Tabla 5. Oxidante, combustible, sensibilizante para cada explosivo.....	61
Tabla 6. Dimensiones de los oxidantes en los explosivos (Bampffield y Morrey, 1984).	62
Tabla 7. Tipos de Explosivos y sus respectivas PRP Y PRV.....	67
Tabla 8. Propiedades técnicas Fortan Advantage 50. (Orica Mining Services [6], 2012)	70
Tabla 9. Propiedades técnicas Fortan Extra 50 (Orica Mining Services [7], 2010).....	72
Tabla 10. Propiedades técnicas Fortis Extra 65. (Orica Mining Services [8], 2012).....	74
Tabla 11. Parámetros técnicos Fortis Advantage 65. (Orica Mining Services [9], 2012).....	75
Tabla 12. Eficiencia chancador por mes caso histórico para costo energético.....	94
Tabla 13. Eficiencia chancador por día caso específico para costo energético.....	95
Tabla 14. Leyes promedio por mes periodo 2015.	95
Tabla 15. Eficiencia chancador por mes caso histórico para beneficio tonelaje pasante.	96
Tabla 16. Eficiencia chancador por día caso específico para beneficio tonelaje pasante.	97
Tabla 17. Parámetros caso base para las propuestas.	106
Tabla 18. Porcentaje pasante caso base para las propuestas.....	107
Tabla 19. Parámetros propuesta 1.....	109
Tabla 20. Porcentaje pasante propuesta 1.....	110
Tabla 21. Parámetros propuesta 2.....	112
Tabla 22. Porcentaje pasante propuesta 2.....	113
Tabla 23. Parámetros propuesta 3.	115
Tabla 24. Porcentaje pasante propuesta 3.....	116

Tabla 25. Parámetros propuesta 4.....	118
Tabla 26. Porcentaje pasante propuesta 4.....	119
Tabla 27. Parámetros propuesta 5.....	121
Tabla 28. Porcentaje pasante propuesta 5.....	122
Tabla 29. Tabla resumen propuestas.	126
Tabla 30. Tabla resumen económico propuestas.....	127
Tabla 31. Costos tronadura período 2015.....	128
Tabla 32. Costos perforación período 2015.	128
Tabla 33. Parámetros caso base para las Demoblast.	129
Tabla 34. Porcentaje pasante caso base para las Demoblast.	130
Tabla 35. Parámetros 1° Demoblast.	132
Tabla 36. Porcentaje pasante 1° Demoblast.	133
Tabla 37. Parámetros 3° Demoblast.	135
Tabla 38. Porcentaje pasante 3° Demoblast.	136
Tabla 39. Parámetros 4° Demoblast.	138
Tabla 40. Porcentaje pasante 4° Demoblast.	139
Tabla 41. Tabla resumen Demoblast.	142
Tabla 42. Tabla resumen económico Demoblast.....	143
Tabla 43. Promedio rendimiento chancador 1er cuartil caso histórico.	144
Tabla 44. Promedio rendimiento chancador 3er cuartil caso histórico.	144
Tabla 45. Costos y dólares aportados por tonelaje por mes (1er cuartil).	144
Tabla 46. Costos y dólares aportados por tonelaje por mes (3er cuartil).	144
Tabla 47. Costos energéticos asociados a chancador y USD por tonelaje caso histórico por cuartil.	145
Tabla 48. Tonelaje-hora y potencia para distintas tronaduras.	145
Tabla 49. Costos energéticos asociados a chancador y USD por tonelaje pasante caso específico por tronadura.....	145
Tabla 50. Costos asociados a cargas redireccionadas por mes (1er cuartil).....	146
Tabla 51. Costos asociados a cargas redireccionadas por mes (3er cuartil).....	146
Tabla 52. Costos asociados a cargas redireccionadas por cuartil.	146
Tabla 53. Costos asociados a cargas redireccionadas por tronadura caso específico.....	147

Tabla 54. Flujo de caja caso histórico.	147
Tabla 55. Flujo de caja histórico (costos).	148
Tabla 56. Flujo de caja caso específico.	148
Tabla 57. Flujo de caja específico (costos).	148
Tabla 58. Incremento/disminución beneficio en fragmentación en propuestas.	149
Tabla 59. Incremento/disminución beneficio en factor de carga total en propuestas.....	149
Tabla 60. Incremento/disminución beneficio en energía efectiva total por tonelada en propuestas.	150
Tabla 61. Incremento/disminución beneficio en costo perforación por tonelada en propuestas.	150
Tabla 62. Incremento/disminución beneficio en precio por tonelada (Tronadura) en propuestas.	151
Tabla 63. Incremento/disminución beneficio en costo final por tronadura (PyT) en propuestas.	151
Tabla 64. Costo perforación histórico.	152
Tabla 65. Costo tronadura histórico.	152
Tabla 66. Costo perforación y tronadura histórico.	152
Tabla 67. Incremento/disminución beneficio en fragmentación en Demoblast.	152
Tabla 68. Incremento/disminución beneficio en factor de carga total en Demoblast.	153
Tabla 69. Incremento/disminución beneficio en energía efectiva total por tonelada en Demoblast.	153
Tabla 70. Incremento/disminución beneficio en costo perforación por tonelada en Demoblast.	154
Tabla 71. Incremento/disminución beneficio en precio por tonelada (Tronadura) en Demoblast.	154
Tabla 72. Incremento/disminución beneficio en costo final por tronadura (PyT) en Demoblast.	154
Tabla 73. Incremento/disminución de beneficio en tonelaje pasante a chancador y potencia caso histórico.	155
Tabla 74. Incremento de beneficio en costo energético caso histórico.	155
Tabla 75. Disminución de beneficio por tonelaje pasante de cobre caso histórico.	156
Tabla 76. Incremento/disminución de beneficio en tonelaje pasante a chancador y potencia caso específico.	156
Tabla 77. Incremento de beneficio en costo energético caso específico.	157
Tabla 78. Incremento/disminución de beneficio por tonelaje pasante de cobre caso específico.	157

Tabla 79. Incremento/disminución de beneficio en cargas redireccionadas caso histórico.	158
Tabla 80. Incremento/disminución de beneficio en costos por cargas redireccionadas caso histórico.	158
Tabla 81. Incremento/disminución de beneficio en cargas redireccionadas caso específico.	158
Tabla 82. Incremento/disminución de beneficio en costos por cargas redireccionadas caso específico.	159
Tabla 83. Incremento en beneficio flujo de caja caso histórico.	159
Tabla 84. Incremento en beneficio flujo de caja costos caso histórico.	159
Tabla 85. Incremento en beneficio flujo de caja caso específico.	160
Tabla 86. Incremento en beneficio flujo de caja costos caso específico.	160

Figuras

Figura 1. Diagrama de operación minera El Abra.	17
Figura 2. Plano Fase 13-14.	19
Figura 3. Plano Fase 14.	19
Figura 4. Índice de dureza IS (50) para banco 3610, fase 13-14.	20
Figura 5. RQD para banco 3610, fase 13-14.	20
Figura 6. Ubicación SCM El Abra.	25
Figura 7. Vista Satelital del rajo de SCM El Abra	26
Figura 8. Ubicación ROM I, ROM II, Gerencia Mina.	28
Figura 9. Organigrama Operaciones Mina.	28
Figura 10. Climas Norte Grande.	31
Figura 11. Flora (Opuntia conoidea).	34
Figura 12. Flora (Cardón).	35
Figura 13. Fauna (Guanaco y zorro culpeo).	35
Figura 14. Tronadura en banco.	36
Figura 15. Componentes principales de una perforadora rotativa.	40
Figura 16. Diseño del tren de oruga.	41
Figura 17. Sistemas de rotación: (a) Directo, (b) Mesa de Rotación.	42
Figura 18. Sarta de perforación.	42

Figura 19. Equipo de perforación Pit Viper 271.	43
Figura 20. Tronadura con proceso i-kon.	45
Figura 21. i-kon SURBS.....	45
Figura 22. i-kon logger.	46
Figura 23. Detonador i-kon.	47
Figura 24. Pentex.....	47
Figura 25. Camión Fábrica.	48
Figura 26. Polvorín Móvil.	48
Figura 27. Agentes explosivos secos con base Nitrato Amónico.....	50
Figura 28. Nitrato de Amonio.	51
Figura 29. Variación de la Energía termodinámica y Velocidad de detonación del ANFO con el contenido de gas-oil.....	53
Figura 30. Humos producidos por diferentes porcentajes de gas-oil.	54
Figura 31. Sensibilidad del ANFO a la iniciación.....	55
Figura 32. Influencia del contenido de agua sobre la velocidad de detonación.	55
Figura 33. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación.....	56
Figura 34. Efecto del Aluminio sobre la Energía desarrollada con respecto a una misma cantidad de ANFO.	57
Figura 35. Agentes explosivos acuosos producidos a partir del NA.....	59
Figura 36. Influencia de la densidad de los hidrogeles sobre la velocidad de detonación y sensibilidad.	60
Figura 37. Composición básica de una emulsión.	63
Figura 38. Estructura del ANFO Pesado.	64
Figura 39. Características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de ANFO Pesado (Du Pont, 1986).	65
Figura 40. Variación de la potencia y densidad de un ANFO Pesado según el porcentaje de emulsión (Bampffield y Morrey, 1984).	65
Figura 41. Variación de la sensibilidad del ANFO Pesado con el porcentaje de emulsión de la mezcla (Bampffield y Morrey, 1984).	66
Figura 42. Potencias relativas obtenidas con diversos porcentajes de aluminio contenido en ANFOS Pesados.	67

Figura 43. Porcentaje de utilización de explosivos en tronaduras periodo 2015.	68
Figura 44. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación (Ash, 1977). (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)	78
Figura 45. Velocidad de detonación del ANFO en función de la densidad. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)	81
Figura 46. Nomograma para la determinación del tamaño del bloque. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)	83
Figura 47. Curvas granulométricas teóricas del material volado para diferentes valores de K50. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)	84
Figura 48. Determinación del Coeficiente del Tamaño de Bloque K50 del material fragmentado. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)	84
Figura 49. Predicción de la granulometría y determinación del K80 de la roca volada, mediante el programa KUZ-RAM. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)	88
Figura 50. Modelos JK	89
Figura 51. Caso base para Demoblast y 1° Demoblast en terreno.	92
Figura 52. 2° Demoblast y 3° Demoblast en terreno.	92
Figura 53. Sugerida toma de imágenes en la frente de carguío.	99
Figura 54. Sugerida toma de imágenes.	99
Figura 55. Como funciona Split Desktop.	100
Figura 56. Imagen filtrada en Split Desktop.	100
Figura 57. Curva granulométrica obtenida en Split Desktop.	101
Figura 58. Carguío del pozo caso base para las propuestas.	107
Figura 59. Curva granulométrica caso base para las propuestas.	108
Figura 60. Carguío del pozo propuesta 1.	110
Figura 61. Curva granulométrica propuesta 1.	111
Figura 62. Carguío del pozo propuesta 2.	113
Figura 63. Curva granulométrica propuesta 2.	114
Figura 64. Carguío del pozo propuesta 3.	116
Figura 65. Curva granulométrica propuesta 3.	117
Figura 66. Carguío del pozo propuesta 4.	119
Figura 67. Curva granulométrica propuesta 4.	120

Figura 68. Carguío del pozo propuesta 5.....	122
Figura 69. Curva granulométrica propuesta 5.	123
Figura 70. Curva granulométrica caso base y propuesta 1.	123
Figura 71. Curva granulométrica caso base y propuesta 2.	124
Figura 72. Curva granulométrica caso base y propuesta 3.	124
Figura 73. Curva granulométrica caso base y propuesta 4.	125
Figura 74. Curva granulométrica caso base y propuesta 5.	125
Figura 75. Curvas granulométricas de propuestas y caso base.....	126
Figura 76. Resumen costos propuestas.....	127
Figura 77. Carguío del pozo caso base para las Demoblast.	130
Figura 78. Curva granulométrica caso base para las Demoblast.....	131
Figura 79. Carguío del pozo 1° Demoblast.	133
Figura 80. Curva granulométrica 1° Demoblast.....	134
Figura 81. Carguío del pozo 3° Demoblast.	136
Figura 82. Curva granulométrica 3° Demoblast.....	137
Figura 83. Carguío del pozo 4° Demoblast.	139
Figura 84. Curva granulométrica 4° Demoblast.....	140
Figura 85. Curva granulométrica caso base y 1° Demoblast.....	140
Figura 86. Curva granulométrica caso base y 3° Demoblast.....	141
Figura 87. Curva granulométrica caso base y 4° Demoblast.....	141
Figura 88. Comparación granulometría con escalímetro.....	142
Figura 89. Curvas granulométricas caso base y las Demoblast.....	142
Figura 90. Resumen costos Demoblast.....	143

Ecuaciones

Ecuación 1. Reacción de descomposición del sistema equilibrado en oxígeno.	53
Ecuación 2. Reacción de NA con aluminio en pequeña cantidad.	57
Ecuación 3. Reacción de NA con aluminio en mayor cantidad.	57
Ecuación 4. Ecuación de Larsson.....	83
Ecuación 5. Fórmula de SVEDEFO.....	85

Ecuación 6. Fórmula de Kuznetsov.....	85
Ecuación 7. Fórmula de Kuznetsov Modificada.	86
Ecuación 8. Ecuación de Rosín-Rammler.	86
Ecuación 9. Ecuación de Rosín-Rammler modificada.	87
Ecuación 10. Modelo KUZ-RAM	87
Ecuación 11. Costo energético de chancador histórico.	94
Ecuación 12. Costo energético de chancador específico.	94
Ecuación 13. Beneficio tonelaje pasante chancador análisis histórico.....	96
Ecuación 14. Beneficio tonelaje pasante chancador análisis específico.	96
Ecuación 15. Pérdidas por cargas redireccionadas análisis histórico.	97
Ecuación 16. Pérdidas por cargas redireccionadas análisis específico.....	98
Ecuación 17. Factor de Carga Total.	101
Ecuación 18. Costo de perforación por metro.	102
Ecuación 19. Costo de perforación por tonelada caso histórico.....	103
Ecuación 20. Costo de perforación por tonelada caso específico.....	104
Ecuación 21. Precio por tonelada (Tronadura).....	104
Ecuación 22. Costo final por tonelada (PyT).	104

Capítulo 1: Introducción

1.1 Contexto

Es una temática relevante la situación que conlleva a los costos operacionales asociados a la minería, tanto en la mina misma como en planta, por lo tanto es un constante mejoramiento continuo lo que debe realizarse para lograr alcanzar mayores beneficios y utilidades, esto se debe principalmente a la volatilidad que poseen los precios de los metales, en especial el cobre, para este caso.

Por lo tanto, para reducir estos costos primero se deben visualizar los procesos involucrados a ellos y dentro de esto, se tiene que los procesos de perforación y tronadura son las primeras operaciones unitarias que resultan del diagrama de flujos dentro de lo que es el proceso minero de extracción del material, lo que implica que un buen comienzo podría generar mejoras en los procesos aguas abajo.

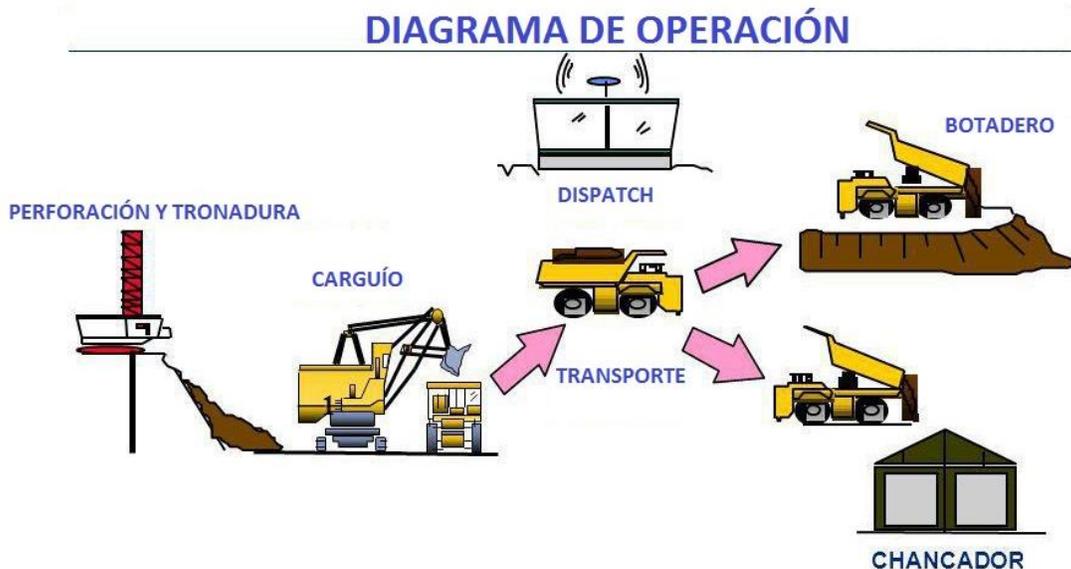


Figura 1. Diagrama de operación minera El Abra.

Dado esto se tiene que existen bastantes características y resultados que se pueden mejorar económica y técnicamente dado un buen proceso de tronadura como lo son la fragmentación, mejorar el rendimiento del proceso de chancado, aumentar recuperación en las pilas, menor desgaste en la flota del proceso de carguío y transporte, etc.

Por lo que, la idea fundamental de la memoria es trabajar en terreno en la minera El Abra en un análisis técnico económico profundo que vea la factibilidad de utilizar a gran escala en el proceso de tronadura un explosivo de alta energía de manera de visualizar cambios en el proceso como posibles aumentos de malla de tronadura, reducción en la fragmentación con el fin de reducir los costos y de esta forma realizar comparaciones con el actual actuar de la minera en la tronadura donde se utilizan explosivos de menor energía pero menor costo.

Este nuevo tipo de explosivos de alta energía a utilizar llamados, Vistan 225 y Vistis 225, son nuevos productos explosivos a granel que la empresa Orica ha desarrollado para el mercado. El primero corresponde al tipo ANFO pesado y el segundo a emulsiones dopadas bombeables. Estos productos proporcionan altos grados de energía, muy superior al cualquier explosivo a granel existente. Fueron especialmente diseñados para lograr altos grados de fragmentación, cuyo propósito principal es alcanzar mayores contenidos de finos en las tronaduras, para así aumentar el desempeño de los procesos de Chancado Primario. (Orica Mining Services [1], 2015)

La minera El Abra, de ser factible el uso de estos nuevos explosivos, busca reducir sus elevados costos de extracción, aunque es evidente que estos nuevos explosivos al poseer mayor energía poseen un costo más elevado, sin embargo, se puede lograr reducción de costos en los procesos posteriores de ser rentable técnica y económicamente, ya que una de las problemáticas de la minera es la fragmentación deficiente que se está obteniendo en sectores de roca altamente competente, en especial en el sector de fase 13 y fase 14, lugar donde se realizarán las pruebas respectivas. En estos sectores es predominante en cuanto a litología la roca denominada Diorita Central, la que corresponde a un Cuarzo Diorita con un 60% de plagioclasa (1-3 [mm]), 8-10% biotita (cristales tabular, 0,5-1 [mm]), cuarzo 7-10% (intersticial, arriba de 3 [mm]), feldespato potásico <5% (reemplazo de plagioclasa, 2-4 [mm]), piroxeno 2-3% (ocurre de forma masiva, 1-2 [mm]) y hornblenda 0,3-4% (verde, a partir de piroxeno), este tipo de litología se encuentra rodeada de Pórfido Abra el cual está compuesto de fenocristales (35-70%), plagioclasa (2-12 [mm], 40-60%), cuarzo (1-5 [mm], 3-10%), biotita hexagonal a quebradiza (1-4 [mm], 5%) y hornblenda (3-15 [mm], 5%).

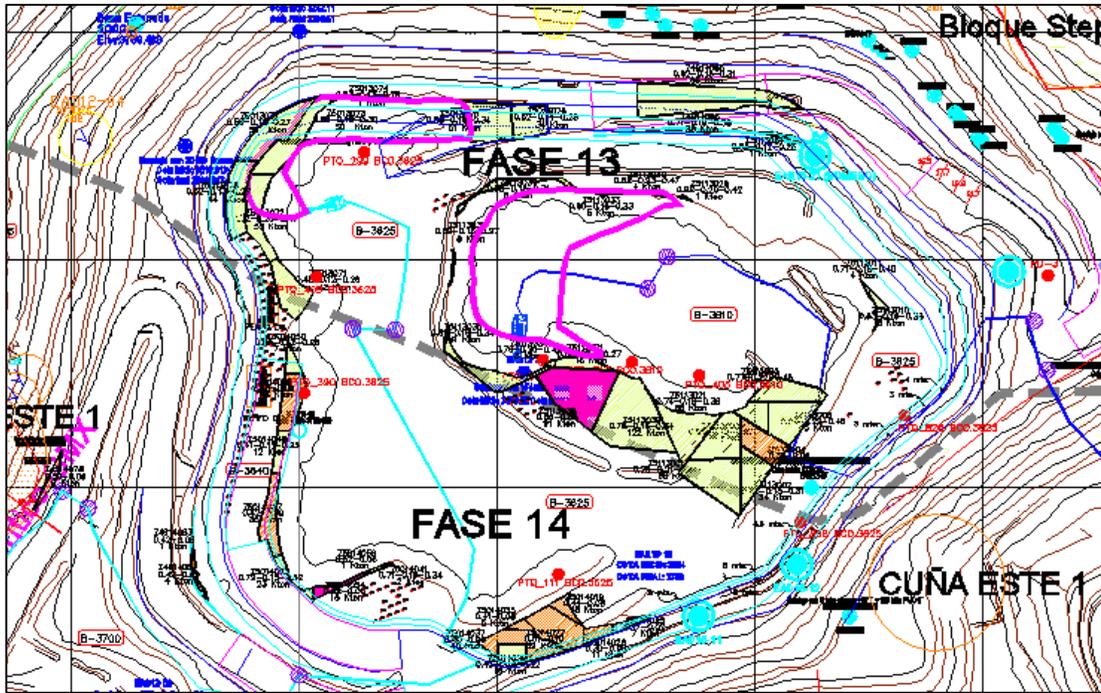


Figura 2. Plano Fase 13-14.

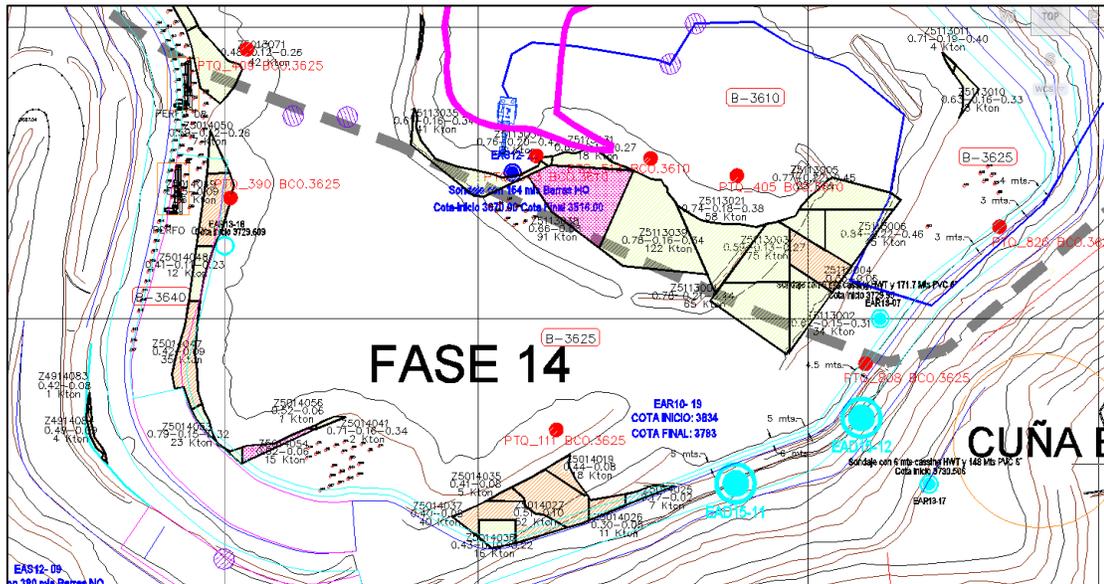


Figura 3. Plano Fase 14.

En estos sectores se presenta dureza Alta, Muy Alta y Extremadamente Alta según el índice de dureza IS (50), específicamente para los bancos 3610 y 3625, sector donde se realizarán las pruebas, considerando una altura de banco de 15 [m] estándar para toda la mina.

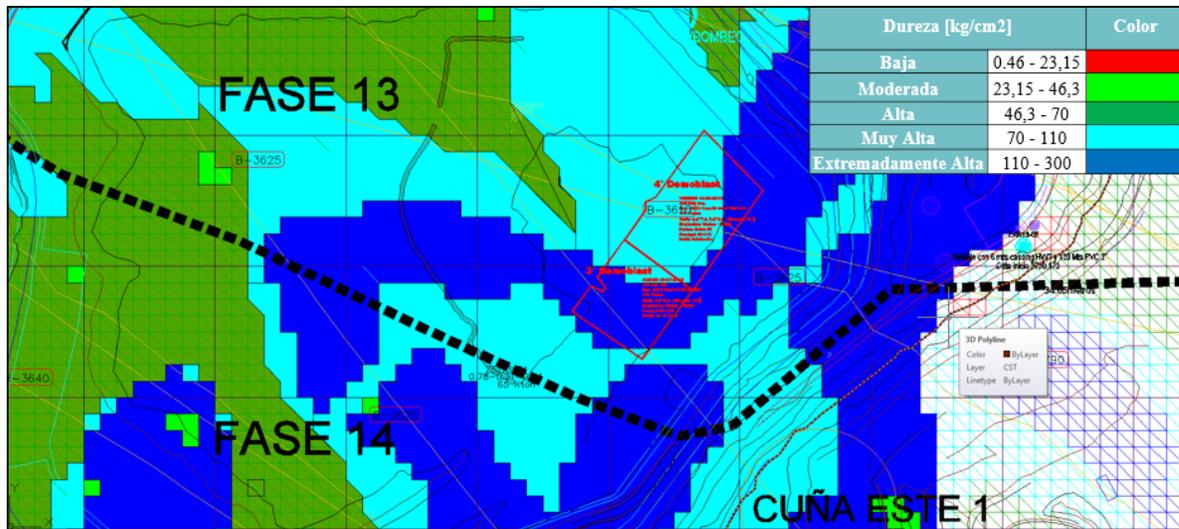


Figura 4. Índice de dureza IS (50) para banco 3610, fase 13-14.

Además, en el mismo sector se tiene predominantemente RQD (Rock Quality Designation) Alto con presencia de RQD Muy Alto también.

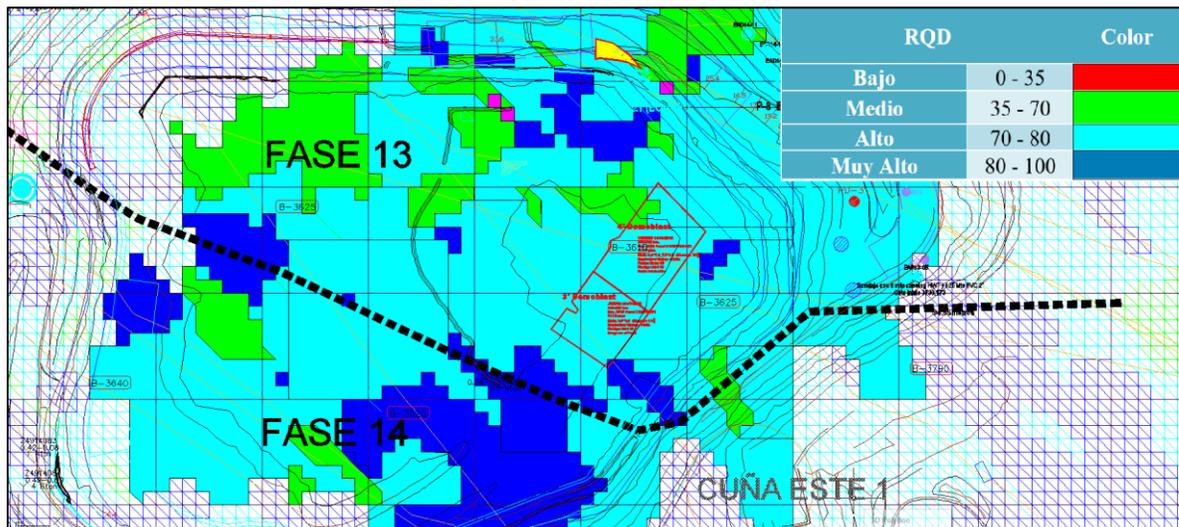


Figura 5. RQD para banco 3610, fase 13-14.

Todo lo anterior presenta una oportunidad de desarrollo en el conocimiento de esta materia a través del trabajo de esta memoria, lo cual ayudaría a agregar valor a la empresa a futuro de ser aplicadas las medidas tomadas y un gran aporte al desarrollo profesional del alumno.

1.2 Objetivos

1.2.1 Propósito

- Aplicar explosivos de alta energía de manera de estandarizar la forma de tronar en una zona específica de minera El Abra para lograr resultados adecuados en cuanto a fragmentación y costos.

1.2.2 Objetivo General

- Realizar un análisis técnico económico sobre la factibilidad de aplicar el uso de explosivo de alta energía en minera El Abra, para solucionar problemas de fragmentación en zona de roca altamente competente.

1.2.3 Objetivos Específicos

- Comparar la fragmentación según explosivos comúnmente usados y Vistan/Vistis 225.
- Optimizar la fragmentación en función de mallas, nuevo explosivo y tacos.
- Demostrar que un mayor gasto en tronadura se traduce en un mayor beneficio para la compañía.

1.2.4 Objetivos Operacionales

- Aprender y aplicar los conceptos principales de las operaciones mineras, en especial lo referente al área de Perforación y Tronadura y los procesos involucrados.
- Realizar un análisis técnico-económico para evaluar las distintas alternativas.
- Evaluar económicamente el uso de explosivos de alta energía.

- Realizar análisis granulométrico del material, con el fin de confeccionar comparaciones.

1.3 Alcances

El trabajo realizado:

- Solo aplica para minería a rajo abierto, y específicamente a minera El Abra, siendo un yacimiento de tipo pórfido cuprífero.
- Analiza solamente los bancos 3610 y 3625, ubicados en el fondo mina.
- Aplica las fases 13 y 14 del fondo mina.
- Solo aplica para diámetro de perforación de 10 5/8 [“].
- Solo aplica para los explosivos Fortan Extra 50, Fortan Advantage 50, Fortis Advantage 65 y Fortis Extra 65, y considerando los nuevos tipos de explosivos de alta energía Vistis 225 y Vistan 225.
- Aplica para mineral exclusivamente y no para roca considerada estéril.
- Aplica para el área de Perforación y Tronadura de minera El Abra, específicamente al análisis de formas de carguío, dimensión de mallas utilizadas y explosivos utilizados.
- Aplica también a un análisis energético-económico con respecto al rendimiento del chancador, visualizando potencia y costos energéticos.
- Incluye un análisis de pérdidas de material redireccionado por fragmentación gruesa, tonelaje pasante que llega al chancador y perforación & tronadura como tal, considerando los costos asociados a cada una de estas actividades.
- Considera una altura de banco de 15 [m] como estándar con 1 [m] de pasadura.

- Considera un costo de perforación de 12 [USD/m], el cual considera costos de acero y costos asociados a la máquina de perforación.
- No considera análisis de vibraciones provocadas por tronadura.
- No contempla análisis geomecánico con respecto a la estabilidad del rajo al aplicar más energía en las tronaduras debido al cambio de explosivo.
- Para el caso base utiliza las mismas formas de carguío, diseño de mallas y explosivo utilizado que 38 tronaduras realizadas el año 2015, lo que dá representatividad en cuanto a los resultados obtenidos, ya que no hay variación en los parámetros del proceso.
- Tiene que para la representatividad de la fragmentación obtenida, existe un respaldo por parte de 1000 aprox. fotografías tomadas por las palas de extracción directamente en la frente de carguío, estas son analizadas y los resultados obtenidos entregados directamente por personal de la compañía, corroborando los valores obtenidos.
- Es confeccionado en un horizonte temporal de máximo 6 meses dado el contrato de trabajo entre el alumno y Sociedad Contractual Minera El Abra.
- Es desarrollado por el equipo de memoria conformado por integrantes de la Universidad de Chile (Alumno y profesor co-guía) y la ayuda del personal en terreno, tanto de la minera El Abra como de la empresa contratista Orica.

1.4 Limitaciones

- No se obtuvo extracción de material exclusivo de las zonas analizadas, se generó mezcla con otros sectores, esto podría ser evitado mediante mejor coordinación con las pruebas en terreno, sin embargo, la planificación de la extracción es determinante y por ende inamovible, ya que el chancador es constantemente alimentado a partir de más fases y bancos.
- Solo incluye las áreas mina (operaciones) y planta (chancador).
- La confiabilidad de los datos ingresados en la base de datos con respecto a formas de carguío recae en responsabilidad del operador y supervisor.

1.5 Metodología de trabajo

El presente trabajo busca en primera instancia dar a conocer el contexto en el que se encuentra inserto el mismo, para luego entregar una revisión bibliográfica adecuada y correspondiente al tema planteado. Posteriormente se procede a mostrar la forma de la toma de datos y la secuencia seguida para la obtención de resultados, con su respectivo análisis. Seguido a esto se consigue conciliar los resultados y análisis en conclusiones y conjeturas de manera de determinar si fueron alcanzados los objetivos impuestos.

Tabla 1. Carta Gantt.

Actividad/meses	Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Recopilación de antecedentes bibliográficos	■	■	■	■	■																			
Verificación de Objetivos					■	■	■	■																
Definición de metodología									■	■														
Concentración de datos de terreno											■	■	■	■	■	■								
Resultados (KPI)													■	■	■	■	■							
Análisis de resultados															■	■	■	■						
Evaluación final y medidas de control																			■	■	■			
Revisión y alineamiento																					■	■	■	■

1.6 Aspectos Generales

1.6.1 Descripción de la faena

- **Razón Social:** Sociedad Contractual Minera El Abra (en adelante SCM El Abra).
- **Dirección:** Camino a Conchi Viejo, Km. 75 s/n Calama.
- **Ubicación:** Se encuentra ubicada a 1.700 [km] al norte de Santiago, camino a Conchi Viejo, a 75 [km] al noreste de la ciudad de Calama, Comuna de Calama, Provincia El Loa, II Región de Antofagasta, Chile.

La ubicación de las operaciones mineras se encuentra entre las coordenadas UTM 7.574.700 y 7.580.000 Norte, y 512.500 y 522.500 Este.

La ubicación de las operaciones de la planta de procesos se encuentra entre las coordenadas UTM 7.562.500 y 7.570.000 Norte, y 530.00 y 535.000 Este.

Regionalmente, el yacimiento se ubica 270 [km] al norte de Antofagasta, 75 [km] al noreste de Calama y 40 [km] al norte de Chuquicamata.

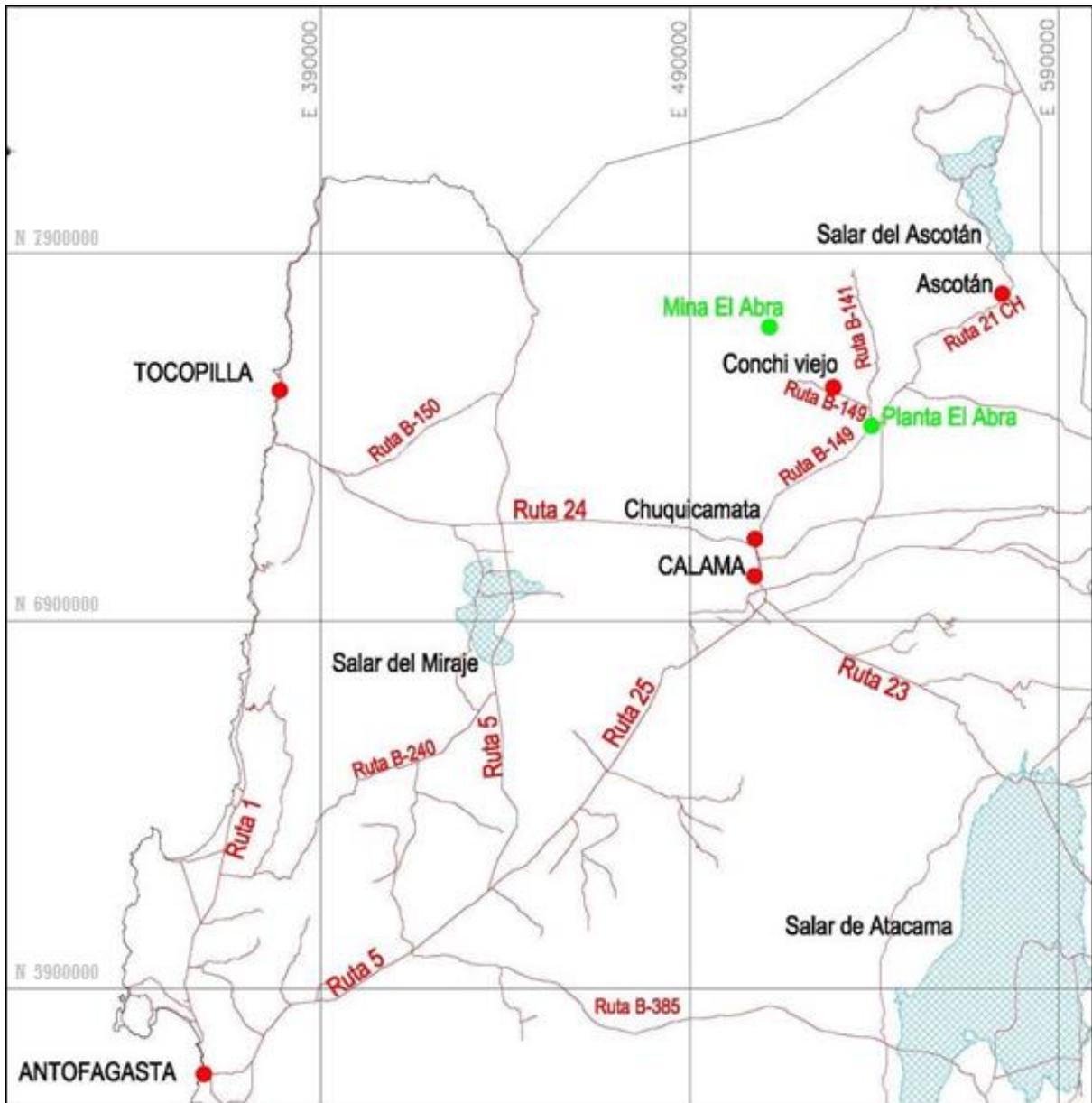


Figura 6. Ubicación SCM El Abra.

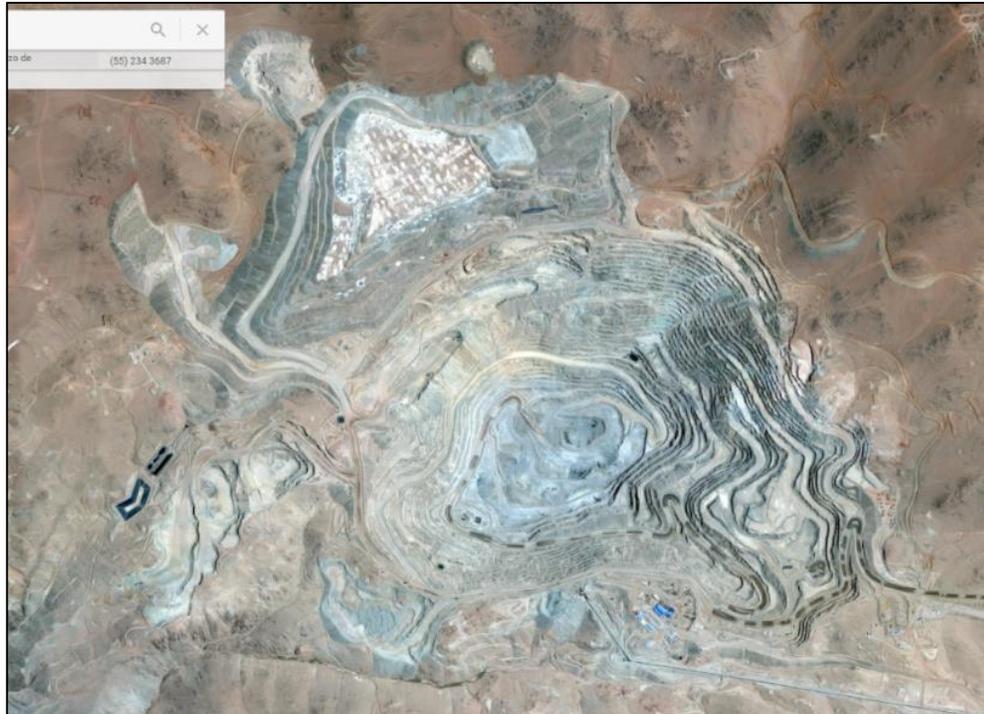


Figura 7. Vista Satelital del rajo de SCM El Abra

- **Compañía:** Freeport McMoran Copper and Gold (FCX).
- **Descripción:** La minera El Abra es una mina de explotación de cobre de tipo cielo abierto, se caracteriza por ser un depósito de pórfido cuprífero que contiene sulfuros y óxidos. El sulfuro primario predominante en la faena es la bornita y calcopirita y posee una cantidad menor de sulfuros secundarios como la calcosina. Los minerales de óxidos de cobre presentes son la crisocola y pseudomalquita, como también turquesa. (Freeport McMoran Copper & Gold - Minera El Abra, 2014)

Las operaciones mineras de esta empresa comenzaron en el año 1996, con 51% perteneciente a FCX (Freeport McMoran Copper and Gold) y 49% a la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco). Las instalaciones constan de la mina cielo abierto en sí y una planta de procesos distanciada a 18 [km] y a 3.300 [m.s.n.m.] aproximadamente ocupando una superficie de 2.400 [Ha], incluyendo una instalación de extracción por solvente y de electrowinning.

Existe un depósito de lixiviación de mineral oxidado de baja ley denominado ROM (Run Of Mine) que se encuentra en la Quebrada Ichuno, al noroeste de la mina.

La planta y la mina se conectan mediante un camino de tierra para vehículos menores y mediante una correa transportadora que transporta el material chancado desde mina a planta.

El acceso se realiza desde Calama por un camino pavimentado que une esta ciudad con la localidad de Chiu-Chiu (33 [km]), aquí existe un desvío de 42 [km] que corresponde a un camino pavimentado que lleva directamente hasta las instalaciones del yacimiento El Abra.

Existe una línea férrea que une a la faena con el Puerto de Antofagasta. A través de ella se transportan los cátodos de cobre y el ácido sulfúrico necesario para el proceso. En Antofagasta se almacena los cátodos transportados desde la faena en un área dentro del Ferrocarril de Antofagasta, denominado “Cancha El Abra”.

Los equipos de maquinaria pesada que posee la mina son:

- 2 palas P&H 4100 XPA
- 2 palas P&H 2800 XPA
- 22 camiones de extracción CAT 793 (modelos B,C y D)
- 4 perforadoras diesel Pit Viper 271

1.6.2 Antecedentes del trabajo

- **Fecha y Horario de Trabajo:** La memoria tuvo su comienzo el día lunes 31 de julio del 2015 y con finalización el día 26 de febrero del 2016.

El horario consistía en un turno de 4x3 (lunes a jueves), con ingreso a las 7:00 y salida a las 19:00 de lunes a miércoles y los días jueves de 7:00 a 16:00.

- **Lugar de Trabajo:** El lugar donde el alumno realizó la mayor parte del trabajo fue en la oficina perteneciente al tutor del respectivo alumno, la cual se encuentra ubicada en la Gerencia Mina de minera El Abra, gerencia encargada de la planificación a corto y mediano plazo y operación y mantención dentro de la mina y ubicada a metros del ingreso a mina; además la memoria también se realizó en terreno, con un promedio de 2 salidas a terreno al día (con terreno se refiere a lo que es mina, planta Orica, ROM 1, ROM 2, fondo mina, etc.).



Figura 8. Ubicación ROM I, ROM II, Gerencia Mina.

- **Equipo de trabajo:** Durante el período de memoria se trabajó con todo el personal de Gerencia Mina en general, que consta de geólogos, ingenieros civiles (de minas, industriales, mecánicos, eléctricos, etc.), topógrafos, geomensores y operadores de maquinaria pesada, pero más específicamente se trabajó con el personal del área de Perforación y Tronadura, siendo el tutor del memorista el Ingeniero Civil de Minas de la Universidad de Antofagasta, Patricio Bracamonte con cargo de Jefe de Perforación y Tronadura.

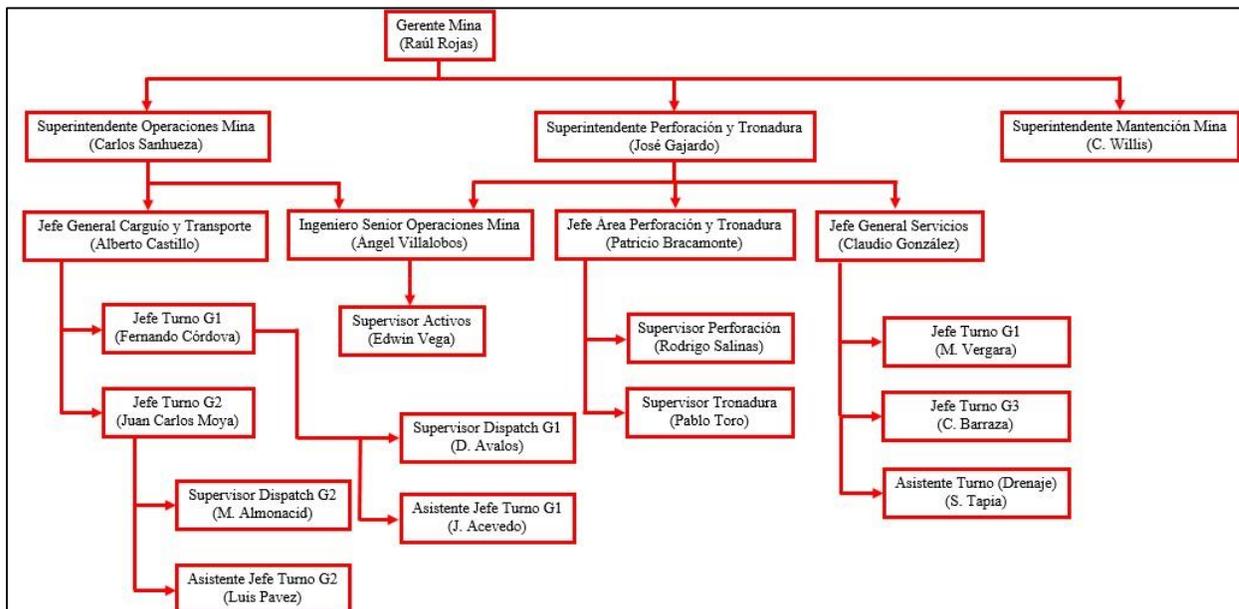


Figura 9. Organigrama Operaciones Mina.

1.6.3 Reseña Histórica

El yacimiento se explota desde épocas prehispánicas, cuando se extraía turquesa y crisocola para fines ornamentales, observándose aún rasgos de los lugares de procesamiento y viviendas en las cercanías del yacimiento.

Los primeros trabajos escala industrial se remontan a principios de siglo, época en que la Compañía Minera de Calama extraía minerales de fundición directa de diversas labores de la zona, especialmente de Veta María, hasta donde se tenía un ferrocarril de trocha angosta desde Conchi Viejo. Entre los años 1920 y 1930 la actividad minera cesó, y la propiedad fue adquirida por Chile Exploration Company, cuyos geólogos realizaron en la zona del yacimiento siete sondajes que demostraron la existencia de mineralización hasta profundidades de 400 [m].

Con el objeto de abastecer a Chuquicamata de sílice (75,6%) como fuente y aprovechando sus altos contenidos en cobre (3,5%) y plata (0,18 [oz/ton]), entre 1957 y 1970 se transportaron desde El Abra hacia Chuquicamata 122.000 TM de mineral, extraído básicamente de los cortes Ojo de Gallo y El Anillo con labores a cielo abierto y subterráneas.

Entre los años 1972 y 1975 Codelco realizó un completo estudio de reconocimiento, evaluación y caracterización metalúrgica. Los resultados arrojaron que el depósito de El Abra contenía reservas probadas y probables aproximadas de 203.500.000 toneladas de material de 0,72% de cobre, de las cuales 79.000.000 toneladas corresponden a óxidos con un 0,65% de cobre y 124.500.000 toneladas a sulfuros con un 0,76% de cobre.

En el año 1993, Codelco Chile ofreció San José de El Abra como “*Joint Venture*”, presentándose en septiembre de dicho año 9 grupos mineros a la propuesta. En Junio de 1994, Cyprus Amax Minerales Company, adquirió el 51% de la propiedad constituyéndose así la primera asociación de Codelco con el sector privado.

Para formular su oferta, Cyprus contó con el asesoramiento de Rothschild Natural Resources y de Bechtel, examinando diferentes opciones financieras y de explotación. El cuerpo mineralizado sería explotado a rajo abierto donde se consideran reservas aproximadas de 800 [MTM] de mineral, con una ley promedio de 0,54% de CuT y una vida útil de 17 años.

Para Cyprus, el proyecto significó una inversión de 1.050 [MMUSD], la capacidad de tratamiento sería de 145.000 [TM/día] de mineral para llegar a producir 225.000 [TM/año] de cobre en cátodos de alta pureza, a través de procesos hidrometalúrgicos (LIX-SX-EW), con un costo de operación de 46 [¢USD/lb].

En septiembre de 1989 comienzan negociaciones entre Asarco y Phelps-Dodge, donde se transan las acciones de Cyprus Amax, finalmente se vende a Phelps-Dodge, quién se hace cargo del 51% de minera El Abra que poseía Cyprus. El traspaso de mando se llevó a cabo completamente a principios de Diciembre de 1999.

Luego Phelps Dodge empieza sus negociaciones para vender sus acciones a Freeport McMoran hacia el año 2008, quien es el actual dueño del 51% de la compañía y Codelco posee el 49% restante.

1.6.4 Aspectos fisiográficos

1.6.4.1 Clima

En la zona noreste de la II región se identifican los siguientes tipos de climas: Desértico Normal, Desértico Marginal de altura, y de Estepa de Altura y, según su ubicación geográfica, Mina El Abra se encuentra situado en el límite entre el clima Desértico Marginal de Altura y el Clima Desértico Normal, sin embargo, predomina un Clima Desértico del tipo Marginal de Altura, que es característico sobre los 3.000 [m.s.n.m.], aun cuando sus características también se evidencian a cotas algo menores.

Las principales características de este clima son su gran claridad atmosférica, una baja humedad relativa, una fuerte oscilación diaria de la temperatura y un bajo nivel de precipitaciones, donde el efecto de la altura reduce la temperatura media anual proporcionándole el carácter de clima frío.

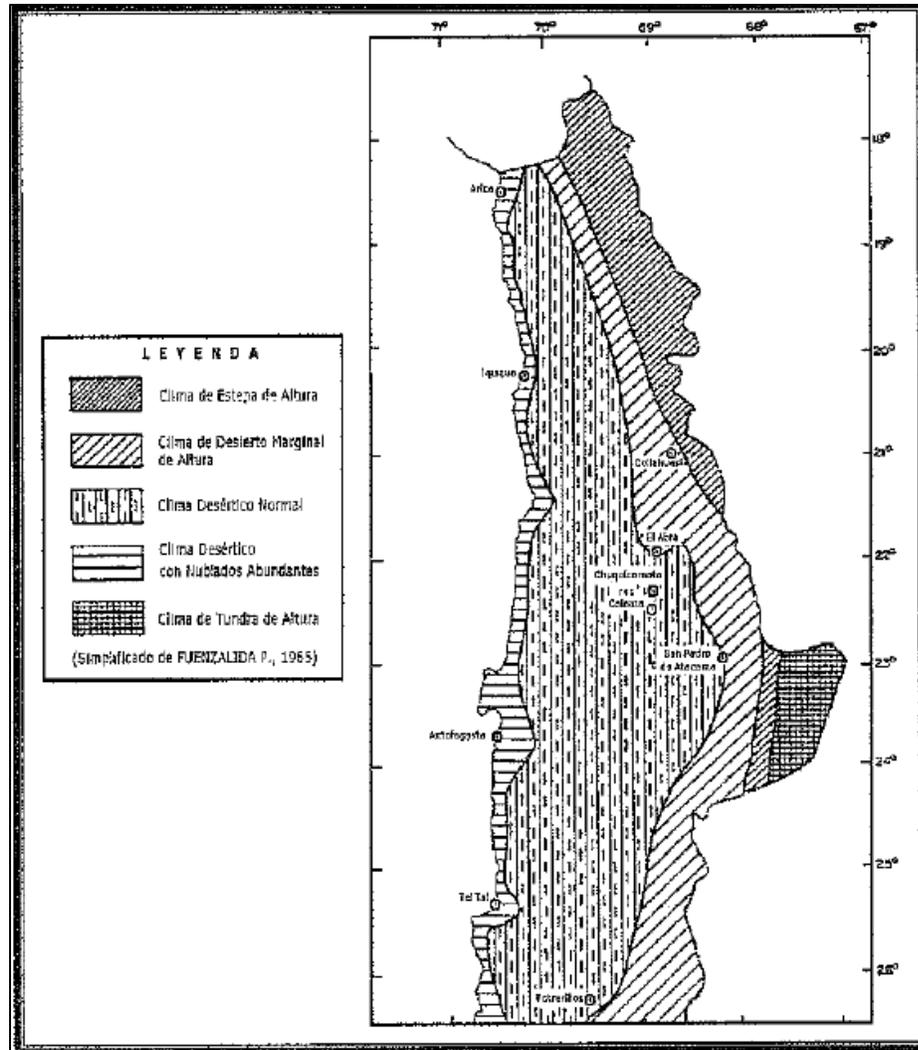


Figura 10. Climas Norte Grande.

1.6.4.2 Precipitaciones

Este clima se caracteriza por un régimen de precipitaciones de verano entre diciembre y marzo, y precipitaciones níveales de invierno, de menor magnitud, cuyo nivel no es suficiente para anular sus características desérticas.

Las precipitaciones de verano se caracterizan por su gran intensidad y corta duración (tormentas), y se presentan en sectores ubicados dentro de una cuenca hidrográfica, o dentro de una sub-cuenca.

En el área de El Abra las precipitaciones registran niveles de 40 a 60 [mm/año], el que varía periódicamente por el efecto del fenómeno climático denominado Invierno Altiplánico. Los últimos años frecuentemente están intercalados por otros años con precipitaciones escasas o nulas. El valor máximo de precipitación diaria frecuentemente representa 40 a 100% del total anual, lo que sugiere que las tormentas son poco frecuentes pero de gran intensidad.

En general, el régimen de precipitación anual en la planta de El Abra fluctúa de 0 a 80 [mm/año], con un nivel promedio estimado de 47 [mm/año], siendo el nivel promedio calculado solo de 1,7 [mm/año], el que corresponde al 4% del nivel promedio estimado.

1.6.4.3 Temperatura

La información disponible respecto de la temperatura en esta zona, ha sido obtenida en una serie de estaciones de medición cercanas a mina El Abra, siendo la estación más próxima la estación Embalse Conchi.

La temperatura de la zona presenta significativa oscilación durante el día, siendo esta mayor en la estación de verano que en invierno, y observándose una clara tendencia decreciente de la temperatura media con la altura geográfica.

En la estación Embalse Conchi, la temperatura media registrada alcanza un valor de 10 [°C], presentando valores máximos y mínimos absolutos entre 30 [°C] y -10 [°C], respectivamente.

En la estación El Abra se ha registrado una temperatura media de 10 [°C], con valores máximos y mínimos absolutos de 21 [°C] y -1 [°C], respectivamente.

1.6.4.4 Régimen de vientos

En el sector de Mina El Abra se han realizado mediciones del régimen de vientos imperante desde 1993, en cuanto a velocidad y dirección.

Estas mediciones indican que para el sector de la planta la velocidad media del viento es de 5 [m/s], registrándose una velocidad máxima de 25 [m/s], y con una dirección predominante Noroeste.

Para el sector de la mina rajo abierto, la velocidad media del viento es del orden de 8 [m/s], registrándose una velocidad máxima de 30 [m/s], y con una dirección predominante al Norte.

En la compañía hay tres tipos de alertas de viento dependiendo de la intensidad de estas. La siguiente tabla ilustra las distintas alertas de viento:

Tabla 2. Alertas por tormentas de viento en SCM El Abra.

Alerta	Velocidad viento [km/h]	¿Qué hacer?
1	50 – 88	<ul style="list-style-type: none"> • Usar barboquejo y protección visual hermética (antiparras). • Detener los trabajos en altura física. • Detener los trabajos de izaje con grúas móviles. • Detener los trabajos de descarga de ácido sulfúrico. • Suspender los trabajos con explosivos. • Suspender las actividades en piscina de refino. • Tomar precauciones en el manejo de equipo pesado.
2	89 – 117	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplir con lo indicado en el nivel de alerta 1. • Restringir la circulación de personal a pie. • Solo podrán circular vehículos autorizados.
3	> 117	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplir con lo indicado en el nivel de alerta 1 y 2. • Todo personal debe acudir a los refugios. • Prohibición absoluta para el desplazamiento de peatones. • Solo circulan vehículos de emergencia. • Se prohíbe todo tipo de trabajo al aire libre. • Se suspende tránsito vehicular.

1.6.4.5 Evaporación

Las tasas de evaporación varían de 6 a 9 [mm] diarios. En general, las tasas de evaporación son inversamente proporcionales a la altura, esto es, los valores más altos se producen a las menores alturas.

1.6.4.6 Hidrología regional

La cuenca regional en el área de proyecto está definida por la captación de agua superficial del Río Loa. El Río Loa nace cerca de Ojos del Mino, a una altura aproximada de 3.800 [m.s.n.m.], y viaja unos 420 [km] antes de desembocar en el Océano Pacífico.

La captación regional de agua superficial se dilucida como la subcaptación Quebrada de Barrera. Los límites de la subcuenca captadora regional de agua superficial están definidos al Este por la divisoria topográfica de Sierra del Medio, al Oeste por el Río Loa en el plano aluvial de la Pampa del Tamarugal, al sur por la divisoria de la subcuenca captadora con el Río San Salvador, y al norte por la divisoria de la subcuenca definida por la confluencia de la Quebrada de Barrera y del Loa.

La subcuenca regional de agua superficial definida anteriormente representa un área de aproximadamente 4.010 [km²].

Dentro de la subcuenca Quebrada de Barrera, la única corriente permanente de agua superficial existente es el Río Loa, por debajo de la confluencia con el Río San Salvador. La red de quebradas, que incluye desde los tramos superiores de la Quebrada Ichuno, hasta los tramos inferiores de la Quebrada de Barrera, exhibe escurrimientos de agua superficial intermitentes durante los pocos eventos de precipitación de alta intensidad. Se han mapeado las vertientes de agua subterránea en las inmediaciones de la Mina El Abra.

1.6.4.7 Flora y fauna

La flora del área está conformada por unas 43 especies de plantas vasculares, que se encuentran relacionadas principalmente con la flora del altiplano de la Región de Antofagasta.

La forma de vida más frecuente es la de arbustos bajos, quienes definen la fisonomía del paisaje; les siguen en importancia las hierbas perennes y las gramíneas en campos.

En la zona se encuentra la cactácea *Echinopsis atacamensis* (cardón), la que es considerada como una especie vulnerable (Impuesto por CONAF desde 1989). Se distribuye entre los 2.600 y los 3.800 [m.s.n.m.] probablemente sólo en la II Región. También se tiene la *Opuntia conoidea*, la cual es una especie de cactáceas considerada como “Vulnerable a nivel nacional” de acuerdo a lo establecido por Benoit (1989), y catalogada como “Rara” de acuerdo a la clasificación de Belmonte et al. (1998).



Figura 11. Flora (*Opuntia conoidea*).



Figura 12. Flora (Cardón).

En el área de estudio se reconocen 9 especies de vertebrados, de los cuales 5 son mamíferos, 2 son aves y 2 corresponden a reptiles. Existe una especie que está ampliamente representada en el sector del yacimiento, el guanaco (*Lama guanicoe*). Particularmente el guanaco, a juzgar por la abundancia de sus fecas, frecuencia mucho la quebrada La Lagarta. También existe presencia de zorros culpeo (*Lycalopex culpaeus*).



Figura 13. Fauna (Guanaco y zorro culpeo).

Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

2.1 Operación de perforación y tronadura

El proceso de perforación consiste en la excavación de pozos de cierto diámetro y largo que posteriormente serán cargados con explosivos para realizar tronadura, la cual tiene como finalidad la fragmentación de la roca.



Figura 14. Tronadura en banco.

En minería a cielo abierto y más específicamente en minera El Abra, el procedimiento de perforación y tronadura se compone de distintas etapas, primero para la perforación se tiene:

- Programación de la ubicación de los pozos a perforar.
- Selección de los aceros a utilizar.
- Preparación de la zona de trabajo (topografía y limpieza).
- Traslado equipo de perforación al sector.
- Posicionamiento del equipo de perforación en el sector.
- Perforación.
- Muestreo de detritus.
- Verificación de la calidad y cantidad de tiros perforados.
- Retiro del equipo del sector.

En el caso de tronadura, se tiene la siguiente secuencia:

- Preparación de la zona de trabajo (aislamiento del sector).

- Primado, es decir, colocar la prima en el pozo (Booster). A veces existe el proceso de carga en el taco, donde se coloca un Pentex CD de 900 [g] en el fondo, taco de 6 [m] y luego un Pentex CD de 450 [g] en la carga del taco de 0,5 [m].
- Posicionamiento de equipos de carguío de explosivos.
- Introducción del explosivo y los accesorios necesarios
 - Para el caso del carguío de explosivo, se tiene que puede ser bombeable o vaciable, para el primer caso, mediante una manguera el explosivo es introducido en el pozo desde abajo hacia arriba comúnmente utilizado para pozos con presencia de agua, para el caso vaciable, utilizado generalmente para pozos secos, el explosivo es introducido desde la parte superior del pozo ya sea con un brazo mecanizado o una manguera.
- Control de calidad del explosivo (siempre y aleatorio en cada tronadura).
- Tapado del pozo.
- Amarre según secuencia especificada.
- Revisiones de seguridad en el sector.
- Primer aviso, avisos posteriores y último, conjunto a evacuación del sector (100 metros equipos y 500 metros personal).
- Polvorazo (tronadura).
- Ventilación o limpieza del sector.
- Revisión de seguridad (tiros quedados, fragmentación, etc.).
- Quema de tiros quedados, descolgado de bloques, reducción secundaria (en casos que corresponda).

2.1.1 Perforación

Existen distintos métodos de perforación de rocas a lo largo del mundo:

- a) Mecánicos:
 - Percusión.
 - Rotación.
 - Rotopercusión.
- b) Térmicos:
 - Soplete o lanza térmica.
 - Plasma.
 - Fluido caliente.
 - Congelación.
- c) Hidráulicos:
 - Chorro de agua.
 - Erosión.
 - Cavitación.

- d) Sónicos:
 - Vibración de alta frecuencia.
- e) Químicos:
 - Microvoladura.
 - Disolución.
- f) Eléctricos:
 - Arcoeléctrico.
 - Inducción magnética.
- g) Sísmicos:
 - Rayo Láser.
- h) Nucleares:
 - Fusión.
 - Fisión.

Sin embargo, en minería a cielo abierto se utiliza generalmente y de forma muy amplia los métodos mecánicos. Los componentes principales de un sistema de perforación de este tipo son: la perforadora que es la fuente de energía mecánica, el varillaje que es el medio de transmisión de esa energía, la boca que es el útil que ejerce sobre la roca dicha energía y el fluido de barrido que efectúa la limpieza y evacuación del detrito producido.

Dentro de la amplia variedad de los trabajos de excavación con explosivos, se han desarrollado un gran número de máquinas que dan lugar a dos procedimientos de perforación:

- **Perforación manual:** Se lleva a cabo con equipos ligeros manejados a mano por los perforistas. Se utiliza en trabajos de pequeña envergadura donde por las dimensiones no es posible utilizar otras máquinas o no está justificado económicamente su empleo.
- **Perforación mecanizada:** Utilizada en minera El Abra, consiste en que los equipos de perforación van montados sobre unas estructuras, de tipo mecano, con las que el operador consigue controlar todos los parámetros de la perforación desde unas posiciones cómodas. Estas estructuras o chasis pueden ir montadas sobre neumáticos u orugas y ser automotrices o remolcables.

Por otro lado, para los tipos de trabajo en obras de superficie se tiene que el más ampliamente utilizado es el de perforación de banqueo, siendo el mejor método para la tronadura de rocas el cual dispone de un frente libre para la salida y proyección del material y permite una sistematización de las labores. Se utiliza tanto en proyectos de cielo abierto e interior con pozos verticales, generalmente, y también horizontales, en algunos casos poco frecuentes.

Los dos grandes métodos mecánicos de perforación de rocas son los rotopercutivos y los rotativos (Manual de perforación y voladura de rocas [1], 2003):

- **Métodos rotopercutivos:** Son los más utilizados en casi todos los tipos de roca, siendo el sistema más clásico de perforación de pozos. El principio de perforación de estos equipos se basa en el impacto de una pieza de acero (pistón) que golpea a un útil que a su vez transmite la energía al fondo del pozo por medio de un elemento final (boca). Los equipos rotopercutivos se clasifican en dos grandes grupos, según donde se encuentre colocado el martillo (Manual de perforación y voladura de rocas [2], 2003):
 - **Martillo en cabeza:** En estas perforadoras dos de las acciones básicas, rotación y percusión, se producen fuera del pozo, transmitiéndose a través de una espiga y del varillaje hasta la boca de perforación. Los martillos pueden ser de accionamiento neumático o hidráulico.
 - **Martillo en fondo:** La percusión se realiza directamente sobre la boca de perforación, mientras que la rotación se efectúa en el exterior del pozo. El accionamiento del pistón se lleva a cabo neumáticamente, mientras que la rotación puede ser neumática o hidráulica.
- **Métodos rotativos:** Se subdividen a su vez en dos grupos, según que la penetración se realice por trituración, empleando triconos, o por corte utilizando bocas especiales. El primer sistema se aplica en rocas de dureza media a alta y el segundo en rocas blandas.

2.1.1.1 Perforación rotativa con triconos

Hasta 1949, la mayor parte de los pozos para tronadura eran realizados mediante perforadoras a rotopercusión y sólo en el caso de rocas muy blandas era aplicable la perforación a rotación mediante bocas de corte o trépanos. Se comenzaron a utilizar de forma generalizada en la minería las bocas denominadas triconos y a aplicar el aire comprimido como fluido de evacuación de los detritus formados durante la perforación.

Los diámetros de los pozos varían entre las 2" y las 17 ½" (50 a 444 [mm]), siendo el rango de aplicación más frecuente en minería a cielo abierto de 6" a 12 ¼" (152 a 311 [mm]). Diámetros mayores están limitados a minas con una elevada producción, y por debajo de 6" casi no se emplean debido a los problemas de duración de los triconos a causa del reducido tamaño de los cojinetes.

Las perforadoras rotativas están constituidas esencialmente por una fuente de energía, una batería de barras o tubos, individuales o conectadas en serie, que transmiten el peso, la rotación y el aire de barrido a una boca con dientes de acero o insertos de carburo de tungsteno que actúa sobre la roca.

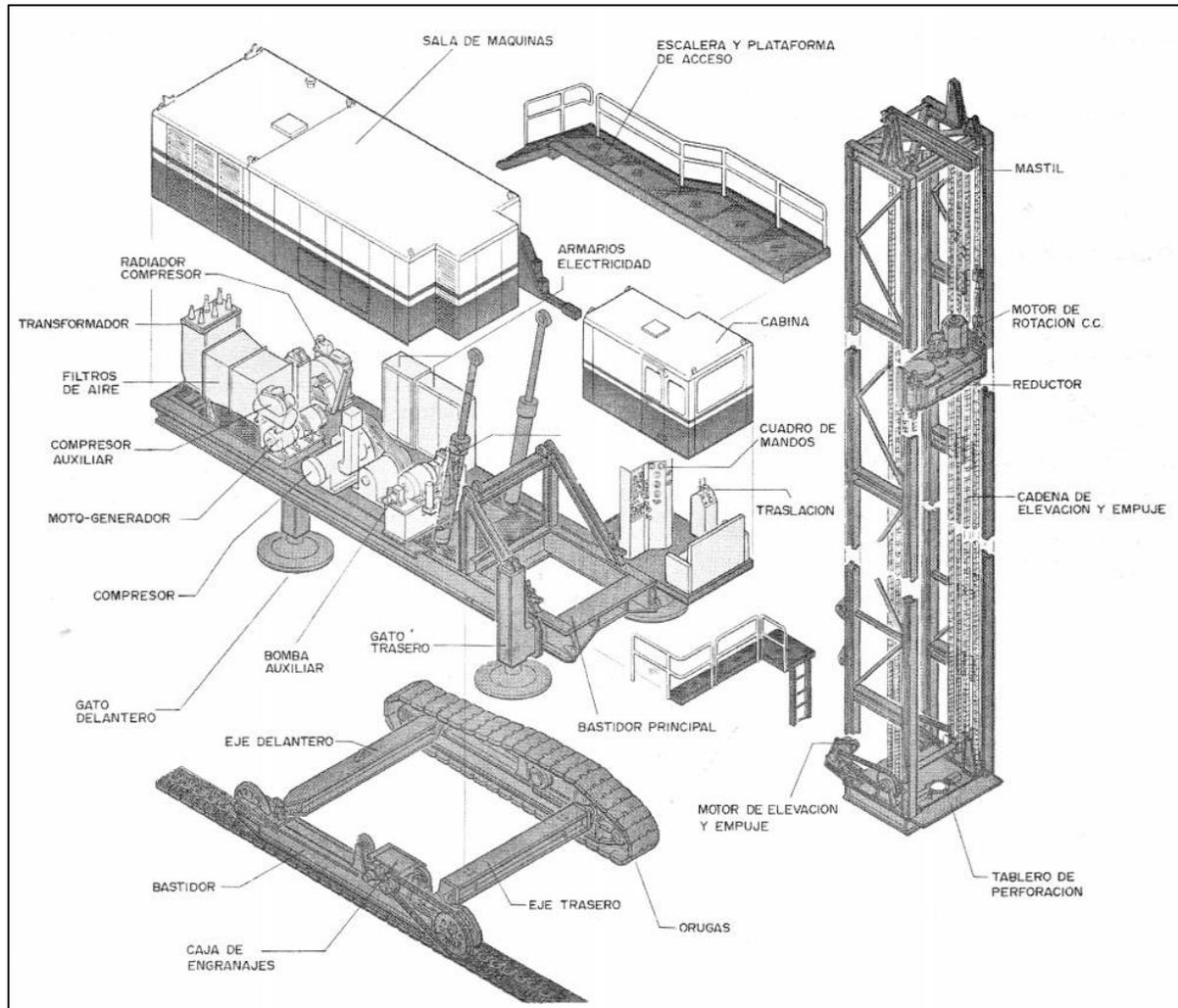


Figura 15. Componentes principales de una perforadora rotativa.

Hay dos sistemas de montaje para las perforadoras rotativas: sobre orugas o sobre neumáticos. Los factores que influyen en la elección de un tipo u otro son las condiciones del terreno y el grado de movilidad requerido.

Si la superficie de trabajo presenta fuertes pendientes, desniveles o baja capacidad portante, el montaje sobre orugas es el más indicado, ya que proporciona la máxima estabilidad, maniobrabilidad y flotabilidad. Un eje rígido situado en la parte trasera de la máquina y un eje pivotante permite al equipo oscilar y mantener las orugas en contacto con el terreno constantemente.

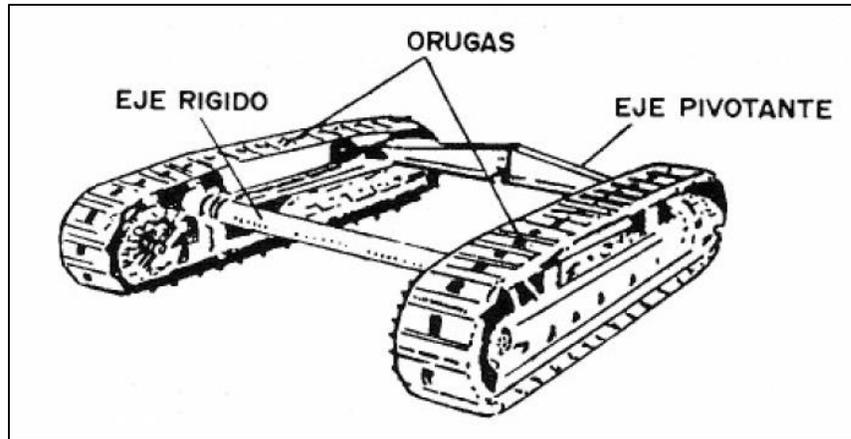


Figura 16. Diseño del tren de oruga.

La mayoría de las grandes perforadoras van montadas sobre orugas planas, ya que éstas pueden soportar mayores cargas y transmitir menor presión al suelo en el desplazamiento.

Las perforadoras montadas con orugas de teja, tipo tractor, son útiles en terrenos difíciles y accidentados como los que se pueden presentar en las obras públicas. El principal inconveniente del montaje sobre orugas es su baja velocidad de traslación, 2 a 3 [km/h], sin embargo, en las grandes operaciones los equipos se desplazan poco, ya que perforan un gran número de pozos en reducido espacio. Durante la perforación, estas unidades se apoyan sobre 3 o 4 gatos hidráulicos que además de soportar el peso sirven para nivelar la máquina.

Las fuentes primarias de energía pueden ser: motores diésel o eléctricos. Luego, con el fin de hacer girar las barras y transmitir el par, las perforadoras llevan un sistema de rotación montado generalmente sobre un bastidor que se desliza a lo largo del mástil de la perforadora. El sistema de rotación Directo puede estar constituido por un motor eléctrico o hidráulico. El sistema hidráulico consiste en un circuito cerrado con una bomba de presión constante y un convertidor de par con el que se logra variar la velocidad de rotación del motor hidráulico, situado en la cabeza de la sarta de perforación. Los sistemas mecánicos o indirectos son el de la Mesa de Rotación. (Manual de perforación y voladura de rocas [3], 2003)

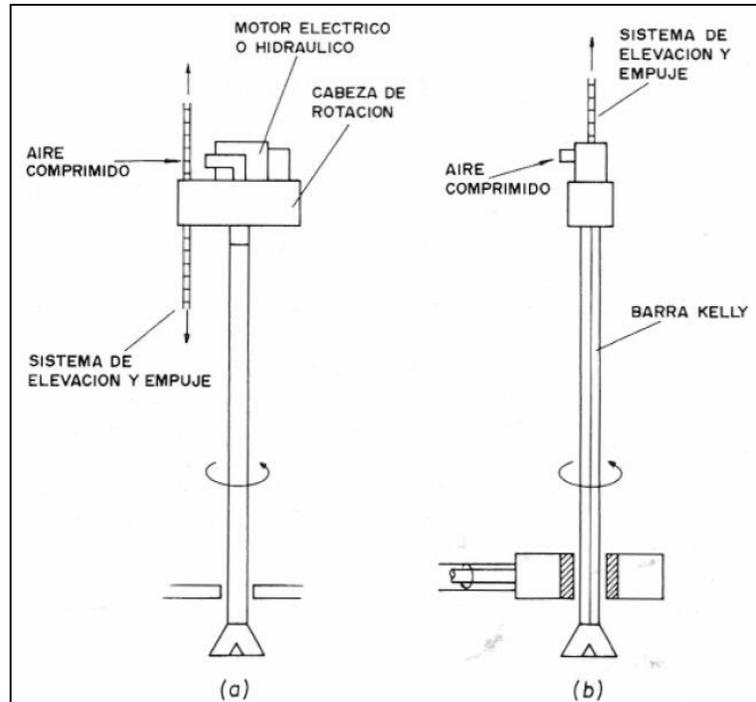


Figura 17. Sistemas de rotación: (a) Directo, (b) Mesa de Rotación.

En cuanto a la sarta de perforación esta está conformada por el adaptador de cabezal, las barras, el estabilizador y el tricono.

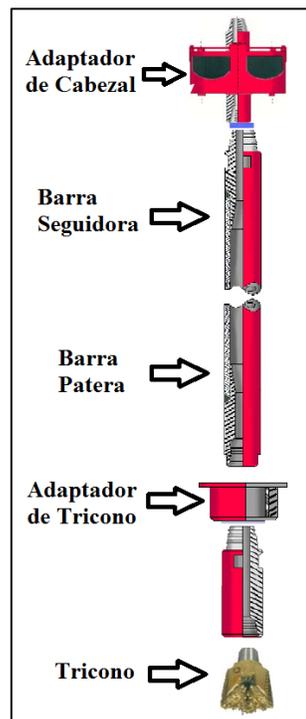


Figura 18. Sarta de perforación.

2.1.1.2 Equipo de perforación utilizado

En el proceso de perforación en la minera El Abra se utilizan los equipos Pit Viper PV-271 de Atlas Copco, dentro de las características más importantes se destaca un sistema de orugas para el transporte y con un sistema de perforación rotativo con triconos de diámetro de $10\frac{5}{8}$ ".



Figura 19. Equipo de perforación Pit Viper 271.

2.1.2 Tronadura

Luego de realizada la perforación, comienza el proceso de tronadura donde para el caso de la minera El Abra se trabaja en conjunto con Orica, el cual contiene distintos procesos y equipos involucrados que se detallarán a continuación:

2.1.2.1 Sistema de iniciación

En minera El Abra se utiliza el sistema básico de i-kon (perteneciente a la empresa Orica), el cual consiste en detonadores electrónicos (estándar y cable tipo RX para aplicaciones más rigurosas) y equipos de control i-kon (Logger y Blaster), aunque también se utilizan en conjunto detonadores Exel MS del tipo pirotécnico en caso de fuga, corte o cualquier eventualidad en el detonador i-kon, los cuales son iniciados en superficie, estos poseen un precio de 4,29 [USD/PC].

Los detonadores son primados dentro de los pozos sin un tiempo de retardo asignado. El tiempo es asignado durante el proceso de cargado de los pozos. Este proceso puede realizarse de varias maneras:

- a) **Iniciar sesión después de cargada la tronadura:** Una vez que todos los pozos son cargados, el *Logger* es conectado a un extremo del cable o línea de conexión (Harness Wire) y el personal encargado de la tronadura debe comenzar a conectar cada detonador a la línea de acuerdo a la secuencia de diseño de disparo correcta. En la medida que cada detonador dentro del pozo es conectado a la línea, el tiempo es asignado a dicho detonador y es descargado a través del diseño de tronadura SHOTPlus-i (programa computacional para el diseño de tronaduras y análisis de secuencias de iniciación en tronaduras a cielo abierto de Orica) o sobre la base de un auto-incremento programado en el *Logger* o introduciendo manualmente el tiempo de retarda a través del teclado del *Logger*.

- b) **Iniciar sesión durante el cargado:** Dado que el proceso de registro es inherentemente seguro, el tiempo de secuencia de inicio puede ser asignado a los detonadores al mismo tiempo que los pozos son cargados. En este caso el cable o línea de conexión (Harness Wire) no es utilizado, más bien el *Logger* es conectado al detonador ya sea a través del cable “*pigtail*” o utilizando los nuevos conectores i-kon y *Logger*. El tiempo es asignado, ya sea en la base de un auto incremento programado en el *Logger* o manualmente introduciendo el tiempo de retardo en el teclado del *Logger*. Más tarde el cable o línea de conexión es extendida y los detonadores son conectados en cualquier orden. De esta forma el personal de la tronadura permite utilizar el tiempo operacional paralelamente al tiempo de cargado de los pozos (se evita el tiempo de inactividad operativa si se espera que el disparo sea cargado en forma completa).

En todos los casos, el *Logger* también pone a prueba la funcionalidad del detonador durante la carga. Cuando la tronadura esta lista, el Harness Wire y *Logger*(s) son conectados al Blaster en un lugar distante y seguro, una prueba final se realiza, luego se envía la señal de detonación a los detonadores a través del Blaster. (Orica Mining Services [2], 2015)

Para ambas formas iniciar sesión, el amarre se realiza mediante un cable de conexión i-kon, para el cual se considera un precio de 188,11 [USD/km] y en caso de ser necesario se utiliza un cordón detonante Cordtex SW (reforzado) con un precio de 322,78 [USD/km].



Figura 20. Tronadura con proceso i-kon.

2.1.2.1.1 Blaster

Corresponde a un sistema electrónico de tronadura que carga los condensadores de los detonadores con cierto voltaje para luego iniciar la tronadura y así lograr con éxito la secuencia, este equipo es utilizado después del amarre de manera de interactuar con los *Loggers* y así identificar a los pozos y asignar el voltaje correspondiente.

Los i-kon SURBS permiten a los blasters iniciar los detonadores i-kon y no-eléctricos remotamente desde un punto de seguridad elegido, lejos de los riesgos y efectos de la tronadura.

En la minera El Abra se utiliza el sistema i-kon SURBS (Surface Remote Blasting System) compuesto de un i-kon Surface Remote Blaster 2400R (o Blaster 2400R) y un i-kon Remote Blast Box (o SURBB) equipados con módems de radio, *Loggers* i-kon y detonadores electrónicos i-kon. (Orica Mining Services [3], 2009)



Figura 21. i-kon SURBS.

2.1.2.1.2 Logger

Es utilizado durante la conexión de los detonadores a la línea para asignar la secuencia de retardo y realizar funciones de prueba. El *Logger* lee y almacena el identificador único (ID) del detonador y asigna el tiempo de retardo. Cada *Logger* puede registrar hasta 200 detonadores y en una misma tronadura pueden ser utilizados hasta 24 *loggers*. El *Logger* por sí mismo no puede iniciar el detonador i-kon. (Orica Mining Services [4], 2009)



Figura 22. i-kon logger.

2.1.2.1.3 Detonador I-kon

Los detonadores i-kon son totalmente programables, tienen circuitos digitales para programar el tiempo y almacenamiento de energía, lo que les permite funcionar de manera independiente una vez que la señal de disparo es enviada al detonador, donde la carga explosiva alojada dentro de la cápsula de aleación de cobre y zinc detona y proporciona una adecuada potencia de detonación asociada a una onda de choque dinámica para iniciar otros agentes explosivos. El cable del detonador es de cobre revestido de acero, entregando mayor resistencia a la tensión, y está recubierto con un polipropileno que le proporciona al alambre un excelente aislamiento y resistencia del mismo a condiciones abrasivas presentes en la mayoría de las minas. En el otro extremo del cable opuesto al detonador hay un conector plástico con resina que permite conectarlo rápida y fácilmente al Harness Wire. El detonador se adapta a todos los tipos de boosters convencionales. Para condiciones particularmente rigurosas en el terreno se recomienda i-kon RX, el cual es muy similar al detonador estándar con la excepción de que el cable tiene una mayor resistencia, ya que posee recubrimiento de poliuretano termoplástico (TPU) que incrementa la protección contra la abrasión en aplicaciones de tronaduras en terrenos difíciles. (Orica Mining Services [2], 2015)

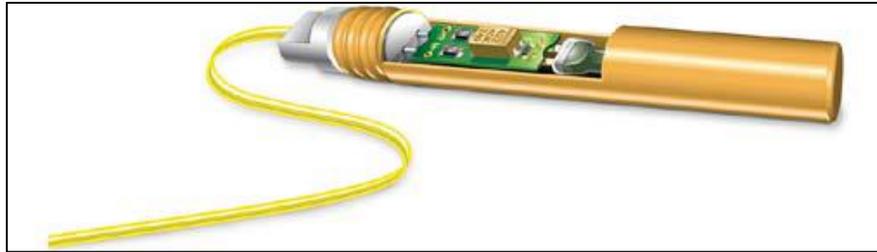


Figura 23. Detonador i-kon.

Se considera para el detonador i-kon RX de 20 metros un precio de 35,33 [USD/PC].

2.1.2.1.4 Pentex

Es un moderno explosivo que provee un alto poder de iniciación en un amplio rango de aplicaciones. Ha sido desarrollado en base a PETN y TNT como materias primas, lo que le confiere la capacidad de ser un explosivo estable y excelente iniciador de cargas poco sensibles o insensibles, de ahí que tiene como característica principal desarrollar una alta presión de detonación.

Se encuentran disponibles dos tipos de boosters, Pentex CD (cilíndrico), disponible en 150, 225, 450 y 900 [g]; así como Pentex CO (cónico), disponible en 450, 900 y 1.350 [g]. Se considera un precio de 4,31 [USD/PC] para el Pentex CD de 450 [g], de 7,76 [USD/PC] para el Pentex CD de 900 [g] y un precio de 11,57 [USD/PC] para el Pentex CO de 1.350 [g].

Los Pentex CD están destinados a servir como iniciadores de cargas primarias poco sensibles tales como los nitrocarbonitratos, emulsiones y mezclas a granel en perforaciones de mediano y gran diámetro. (Orica Mining Services [5], 2013)



Figura 24. Pentex.

2.1.2.1.5 Camión fábrica

Corresponde a un camión mezclador que realiza carga en los pozos de producto a granel para minería de superficie, por lo tanto, es un vehículo que transporta materias primas y fabrica el explosivo en los respectivos pozos de tronadura.



Figura 25. Camión Fábrica.

2.1.2.1.6 Polvorín

Estructura portátil o construcción fija usada para almacenar explosivos y accesorios de tronadura.



Figura 26. Polvorín Móvil.

2.2 Explosivos

Los explosivos químicos industriales se clasifican en dos grandes grupos según la velocidad de su onda de choque:

- a) **Explosivos rápidos y detonantes**: Con velocidades entre 2.000 y 7.000 [m/s].
- b) **Explosivos lentos y deflagrantes**: Con menos de 2.000 [m/s].

Los deflagrantes comprenden a las pólvoras, compuestos pirotécnicos y compuestos propulsores para artillería y cohetaría, casi sin ninguna aplicación en la minería o ingeniería civil, salvo en el caso de rocas ornamentales.

Los explosivos detonantes se dividen en Primarios y Secundarios según su aplicación. Los Primarios por su alta energía y sensibilidad se emplean como iniciadores para detonar a los Secundarios, entre ellos podemos mencionar a los compuestos usados en los detonadores y multiplicadores (fulminato de mercurio, pentrita, hexolita, etc.). Los Secundarios son los que se aplican al arranque de rocas y aunque son menos sensibles que los Primarios desarrollan mayor trabajo útil. Estos compuestos son mezclas de sustancias explosivas o no, cuya razón de ser estriba en el menor precio de fabricación, en el mejor balance de oxígeno obtenido, y en las características y propiedades que confieren los ingredientes a las mezclas en lo relativo a sensibilidad, densidad, potencia, resistencia al agua, etc.

Los explosivos industriales de uso civil se dividen a su vez en dos grandes grupos, que en orden de importancia por nivel de consumo y no de aparición en el mercado son:

- a) **Agentes explosivos**

Estas mezclas no llevan, salvo algún caso, ingredientes intrínsecamente explosivos. Los principales son:

- ANFO
- ALANFO
- HIDROGELES
- EMULSIONES
- ANFOPESADO

b) Explosivos convencionales

Precisan para su fabricación de sustancias intrínsecamente explosivas que actúan como sensibilizadores de las mezclas. Los más conocidos son:

- GELATINOSOS
- PULVERULENTOS
- DE SEGURIDAD

2.2.1 Agentes Explosivos Secos

Este grupo engloba, como ya se ha indicado, todos aquellos explosivos que no son sensibles al detonador y en cuya composición no entra el agua. El factor común es en todos ellos el Nitrato Amónico, por lo que seguidamente se analizarán algunas de sus propiedades.

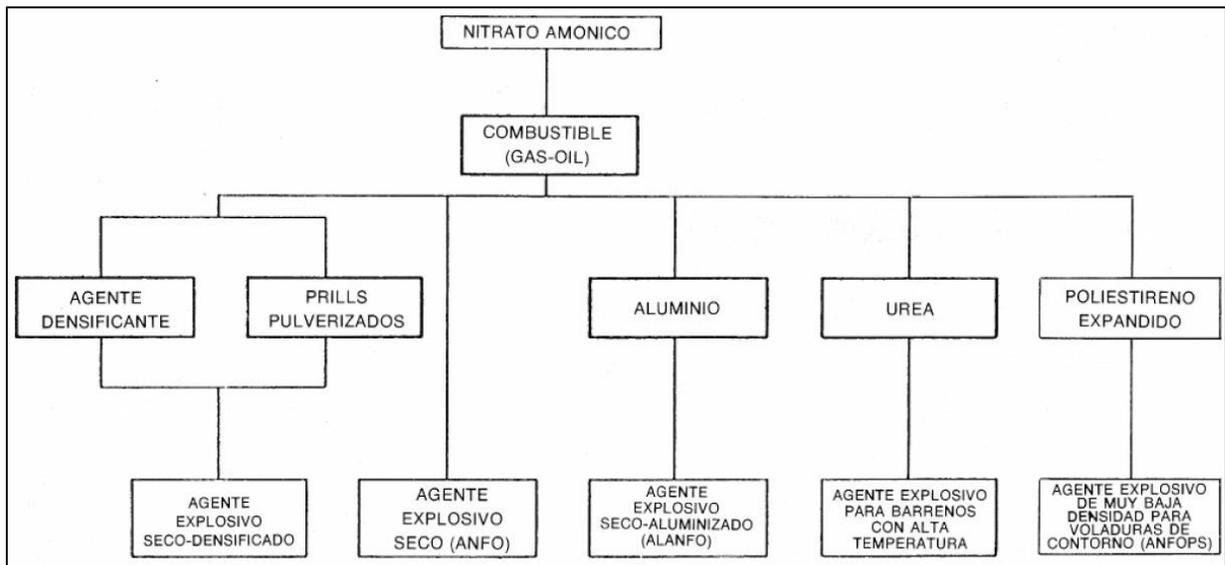


Figura 27. Agentes explosivos secos con base Nitrato Amónico.

2.2.1.1 Nitrato Amónico

El Nitrato Amónico (NH_4NO_3) es una sal inorgánica de color blanco. Aisladamente, no es un explosivo, pues sólo adquiere tal propiedad cuando se mezcla con una pequeña cantidad de un combustible y reacciona violentamente con él aportando oxígeno. Frente al aire que contiene el 21% de oxígeno, el NA posee el 60%.



Figura 28. Nitrato de Amonio.

Aunque el NA puede encontrarse en diversas formas, en la fabricación de explosivos se emplea aquel que se obtiene como partículas esféricas o prills porosos, ya que es el que posee mejores características para absorber y retener a los combustibles líquidos y es fácilmente manipulable sin que se produzcan apelmazamientos y adherencias.

La densidad del NA poroso o a granel es aproximadamente $0,8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, mientras que las densidades de las partículas del NA no poroso se acercan a la de los cristales ($1,72 \text{ [g/cm}^3\text{]}$), pero con valores algo inferiores ($1,40\text{-}1,45 \text{ [g/cm}^3\text{]}$) debido a la microporosidad. El NA de mayor densidad no se emplea debido a que absorbe peor al combustible y por lo tanto reacciona más lentamente con él en el proceso de detonación. Normalmente, el NA utilizado tiene una microporosidad del 15%, que sumada a la macroporosidad se eleva al 54%.

En cuanto al tamaño de las partículas suele variar entre 1 y 3 [mm].

El NA en estado sólido cuando se calienta por encima de $32,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$, cambia de forma cristalina:

β Ortorrómbico Densidad del cristal = $1,72 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

↓ $+32,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$

γ Ortorrómbico Densidad del cristal = $1,66 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

Esta transición es acompañada de un aumento de volumen del 3,6%, produciéndose seguidamente la rotura de los cristales en otros más pequeños. Cuando los cristales γ se enfrían y existe algo de humedad tienden a aglomerarse formando grandes terrones.

La solubilidad del NA en el agua es grande y varía ampliamente con la temperatura:

Tabla 3. Solubilidad del NA dependiendo de la temperatura.

Temperatura [°C]	Solubilidad [%]
10	60,0
20	65,4
30	70,0
40	73,9

de ahí que el ANFO no se utilice en pozos húmedos.

La higroscopicidad es también muy elevada, pudiendo convertirse en líquido en presencia de aire con una humedad superior al 60%. La adición de sustancias inertes hidrofílicas como el caolín o las arcillas en polvo evitan que el NA absorba humedad, aunque también disminuyen su sensibilidad.

La temperatura ambiente juega un papel importante en el proceso de absorción de la humedad.

Tabla 4. Temperatura en proceso de absorción de humedad.

Temperatura ambiente [°C]	Humedad a partir de la cual empieza la absorción [%]
10	76
21	64
32	59

En ocasiones, los granos de NA se protegen con sustancias hidrófugas que impiden su humedecimiento superficial.

El NA es completamente estable a temperatura ambiente, pero si se calienta por encima de 200°C en un recipiente cerrado puede llegar a detonar. La presencia de compuestos orgánicos acelera la descomposición y baja la temperatura a la cual ésta se produce. Así con un 0,1% de algodón el NA empieza a descomponerse a los 160°C. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

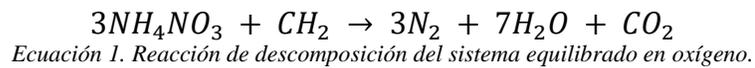
2.2.1.2 ANFO

Cualquier sustancia combustible puede usarse con el NA para producir un agente explosivo. En Estados Unidos a finales de los años 50 se empleaba polvo de carbón pero, posteriormente, fue sustituido por combustibles líquidos ya que se conseguían mezclas más íntimas y homogéneas con

el NA. El producto que más se utiliza es el gas-oil, que frente a otros líquidos como la gasolina, el keroseno, etc., presenta la ventaja de no tener un punto de volatilidad tan bajo y, por consiguiente, menor riesgo de explosiones de vapor.

Los aceites usados se han aprovechado también como combustible, pero tienen los inconvenientes de reducir la sensibilidad a la iniciación y propagación, la velocidad de detonación y el rendimiento energético. Debido a sus altas viscosidades tienden a permanecer en la superficie de los gránulos de NA ocupando los macroporos. Actualmente, no está justificado desde un punto de vista económico la sustitución total o parcial del gas-oil por aceites usados debido a los inconvenientes que entrañan estos productos.

El contenido de combustible juega un papel importantísimo sobre las diferentes propiedades del ANFO. La reacción de descomposición del sistema equilibrado en oxígeno es:



Produciendo unas 920 [kcal/kg], que puede ser inferior en los productos comerciales según el contenido en materias inertes, y un volumen de gases de 970 [L]. La mezcla estequiométrica corresponde a un 95,3% de NA y un 5,7% de gas-oil, que equivalen a 3,7 litros de éste último por cada 50 [kg] de NA.

La influencia que tiene el porcentaje de combustible sobre la energía desprendida y velocidad de detonación se ilustra a continuación:

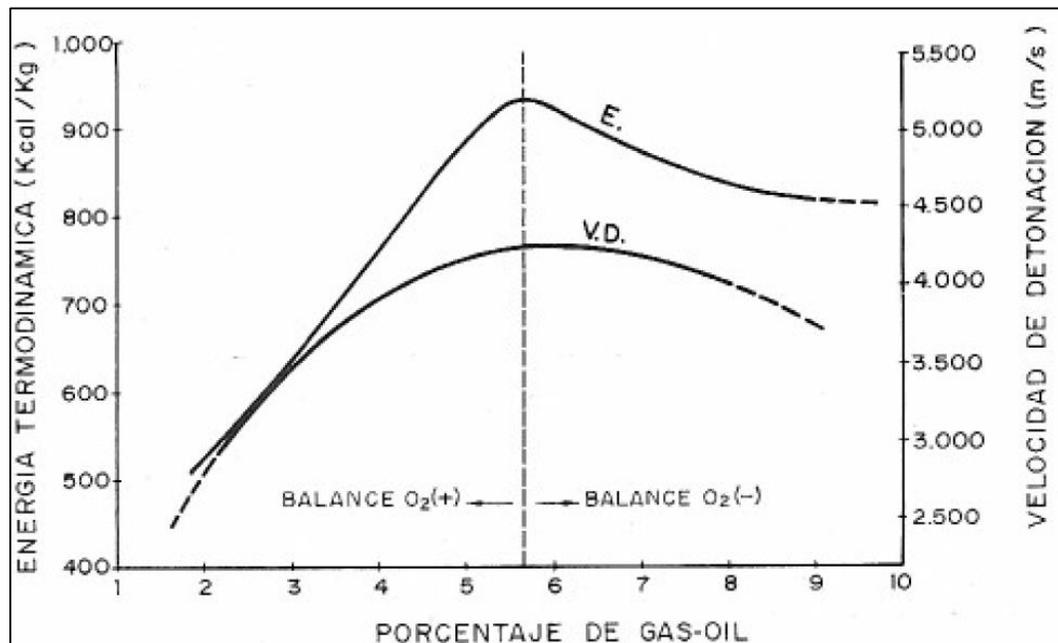


Figura 29. Variación de la Energía termodinámica y Velocidad de detonación del ANFO con el contenido de gas-oil.

Se ve pues que no interesan ni porcentajes inferiores ni superiores al indicado si se pretende obtener el máximo rendimiento en las tronaduras. También el contenido de combustible afecta a la cantidad de gases nocivos desprendidos en la explosión (CO + NO).

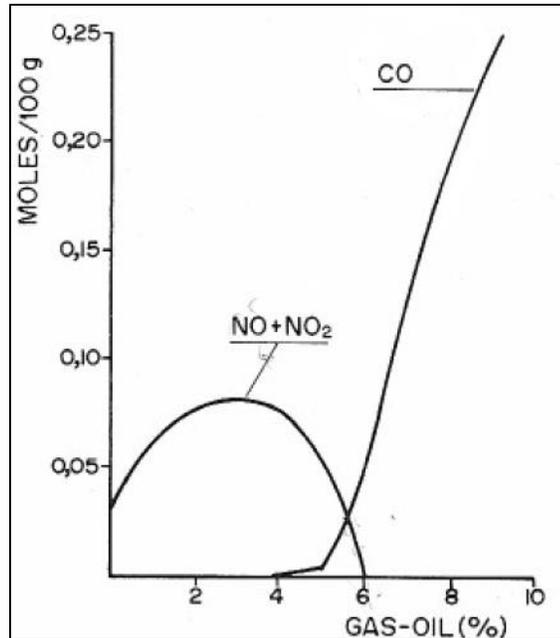


Figura 30. Humos producidos por diferentes porcentajes de gas-oil.

Cuando en las tronaduras los humos producidos tienen color naranja, ello es un indicativo de un porcentaje insuficiente de gas-oil, o bien que el ANFO ha absorbido agua de los pozos o no se ha iniciado correctamente.

La variación de sensibilidad con la cantidad de combustible también es acusada, pues con un 2% de gas-oil la iniciación puede conseguirse con un detonador, aunque la energía disponible es muy baja, y con una cantidad superior al 7% la sensibilidad inicial decrece notablemente.

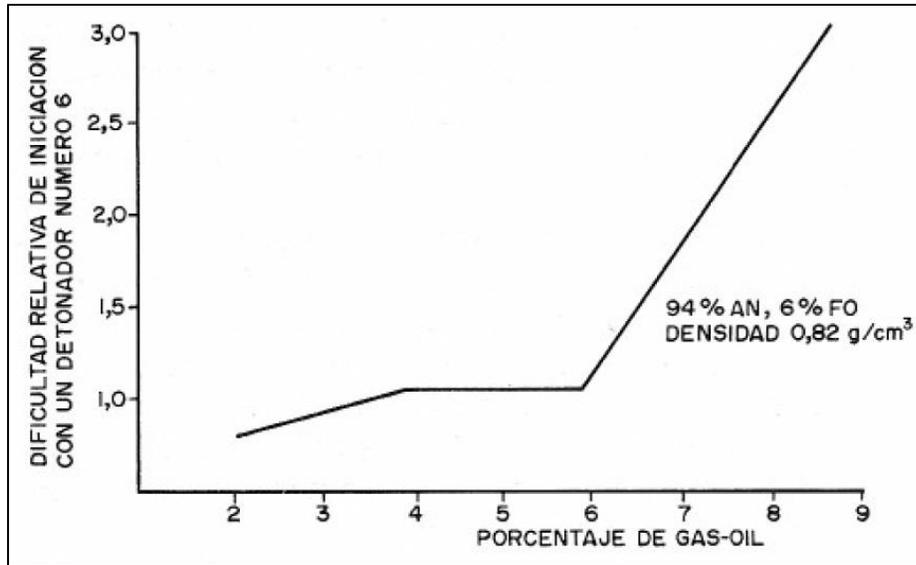


Figura 31. Sensibilidad del ANFO a la iniciación.

Tal como se ha indicado anteriormente con el NA, el agua es el principal enemigo del ANFO, pues absorbe una gran cantidad de calor para su vaporización y rebaja considerablemente la potencia del explosivo. En cargas de 76 [mm] de diámetro una humedad superior al 10% produce la insensibilización del agente explosivo. En tales casos el único recurso de empleo consiste en envolver al ANFO en recipientes o vainas impermeables al agua.

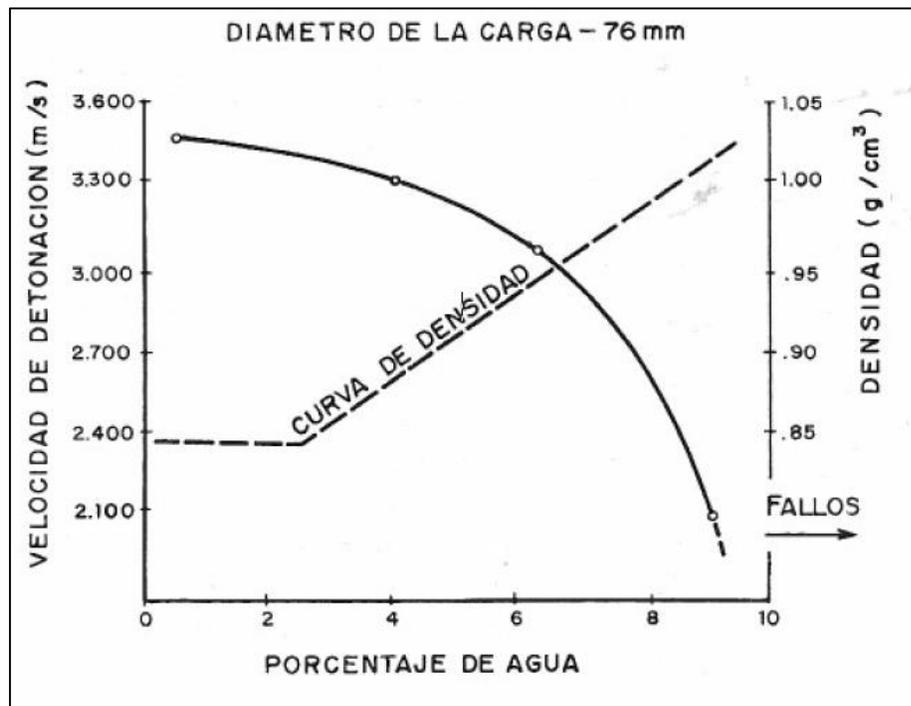


Figura 32. Influencia del contenido de agua sobre la velocidad de detonación.

Las características explosivas del ANFO varían también con la densidad. Conforme ésta aumenta la velocidad de detonación se eleva, pero también es más difícil conseguir la iniciación. Por encima de una densidad de 1,2 [g/cm³] el ANFO se vuelve inerte no pudiendo ser detonado o haciéndolo sólo en el área inmediata al iniciador.

El tamaño de los gránulos de NA influye a su vez en la densidad del explosivo. Así, cuando el ANFO se reduce a menos de 100 mallas su densidad a granel pasa a ser 0,6 [g/cm³], lo que significa que si se quiere conseguir una densidad normal entre 0,8 y 0,85 [g/cm³] para alcanzar unas buenas características de detonación será preciso vibrarlo o compactarlo.

Por otro lado, el diámetro de la carga es un parámetro de diseño que incide de forma decisiva en la velocidad de detonación del ANFO:

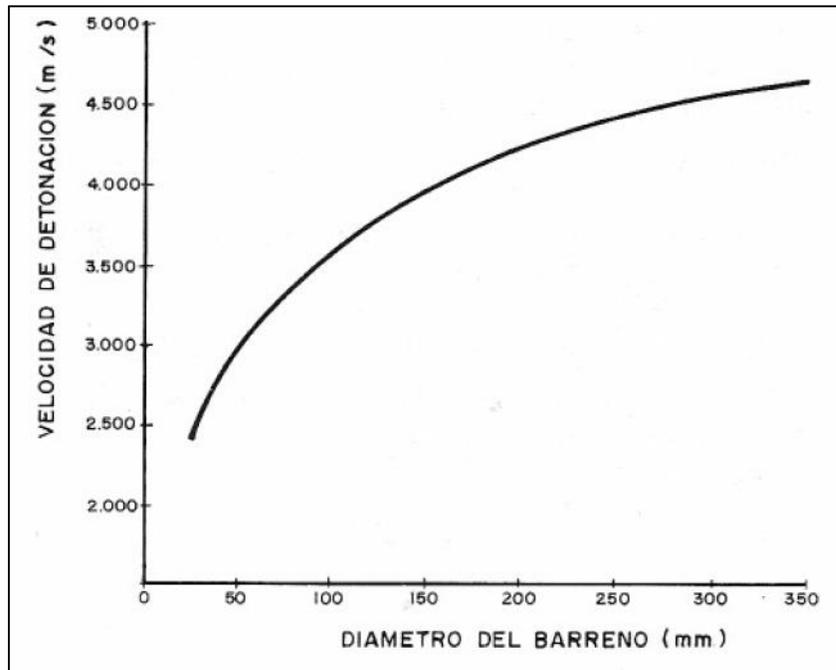


Figura 33. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación.

El diámetro crítico de este explosivo está influenciado por el confinamiento y la densidad de carga.

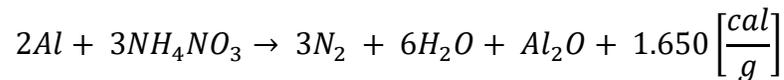
La sensibilidad de iniciación del ANFO disminuye conforme aumenta el diámetro de los pozos.

Aunque el ANFO se emplea predominantemente como carga a granel, es importante saber que la energía por metro lineal de columna disminuye con el desacoplamiento. Cuando el confinamiento de la carga no es grande la «VD» y la presión máxima sobre las paredes de los pozos disminuyen. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

2.2.1.3 ALANFO

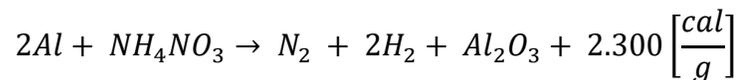
Como la densidad del ANFO es baja, la energía que resulta por unidad de longitud de columna es pequeña. Para elevar esa energía, se añade a ese agente explosivo productos como el Aluminio con unos buenos resultados técnicos y económicos, sobre todo cuando las rocas son masivas y los costes de perforación altos.

Cuando el aluminio se mezcla con el nitrato amónico y la cantidad es pequeña la reacción que tiene lugar es:



Ecuación 2. Reacción de NA con aluminio en pequeña cantidad.

Pero si el porcentaje de aluminio es mayor, la reacción que se produce es:



Ecuación 3. Reacción de NA con aluminio en mayor cantidad.

A continuación se indica la energía producida por el ALANFO con respecto al ANFO para diferentes cantidades de metal añadidas:

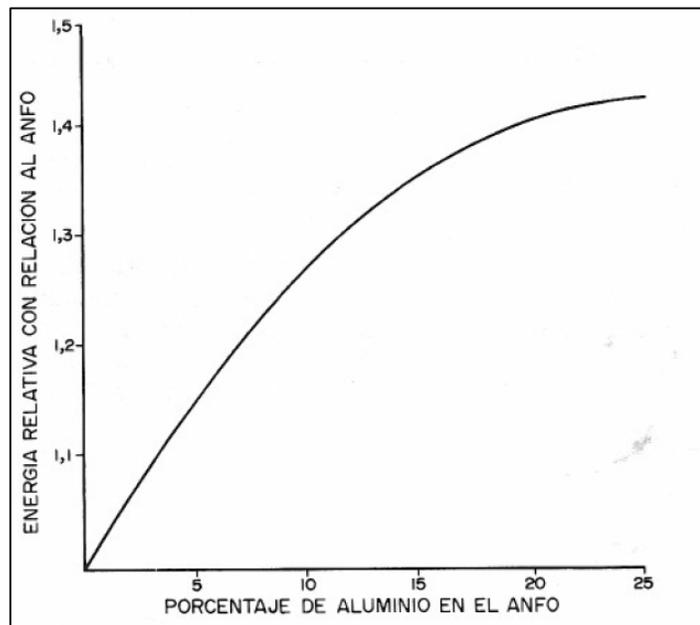


Figura 34. Efecto del Aluminio sobre la Energía desarrollada con respecto a una misma cantidad de ANFO.

El límite práctico, por cuestiones de rendimiento y economía se encuentra entre el 13 y el 15%. Porcentajes superiores al 25% hacen disminuir la eficiencia energética. Las especificaciones que debe cumplir el aluminio son: en cuanto al tamaño que se encuentre casi el 100% entre las 20 y las 150 mallas y en cuanto a la pureza que sea superior al 94%.

En estos agentes explosivos, la pureza no es tan crítica como en los hidrogeles, ya que no es de temer la acción galvánica producida por los cambios de pH. Esto significa que restos o desechos de aluminio de otros procesos pueden emplearse en la fabricación del ALANFO. El límite inferior de tamaño es debido a que si el Al está en forma de polvo pueden producirse explosiones incontrolables. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

2.2.2 Hidrogeles

Los hidrogeles son agentes explosivos constituidos por soluciones acuosas saturadas de NA, a menudo con otros oxidantes como el nitrato de sodio y/o el de calcio, en las que se encuentran dispersos los combustibles, sensibilizantes, agentes espesantes y gelatinizantes que evitan la segregación de los productos sólidos.

Los primeros ensayos positivos fueron realizados con una mezcla del 65% de NA, 20% de Al y 15% de agua. Tras esos primeros resultados, se comenzó a utilizar como sensibilizante el TNT. Posteriormente, se realizaron las primeras experiencias con hidrogeles sensibilizados con aluminio. Este metal planteaba serios problemas de empleo, pues reaccionaba con el agua a temperatura ambiente desprendiendo hidrógeno. Para evitar ese fenómeno se pasó a proteger las partículas de aluminio con productos hidrófugos.

Luego se desarrolló unos nuevos hidrogeles que se caracterizaban por no contener los compuestos explosivos tradicionales, ni metales particulados como sensibilizantes fundamentales, sino que incorporaban como combustible sustancias orgánicas como las derivadas de las aminas, parafinas, azúcares, etc.

A continuación se indican los principales tipos de explosivos acuosos obtenidos a partir del Nitrato Amónico, en dos grandes grupos que son los hidrogeles y las emulsiones con sus mezclas:

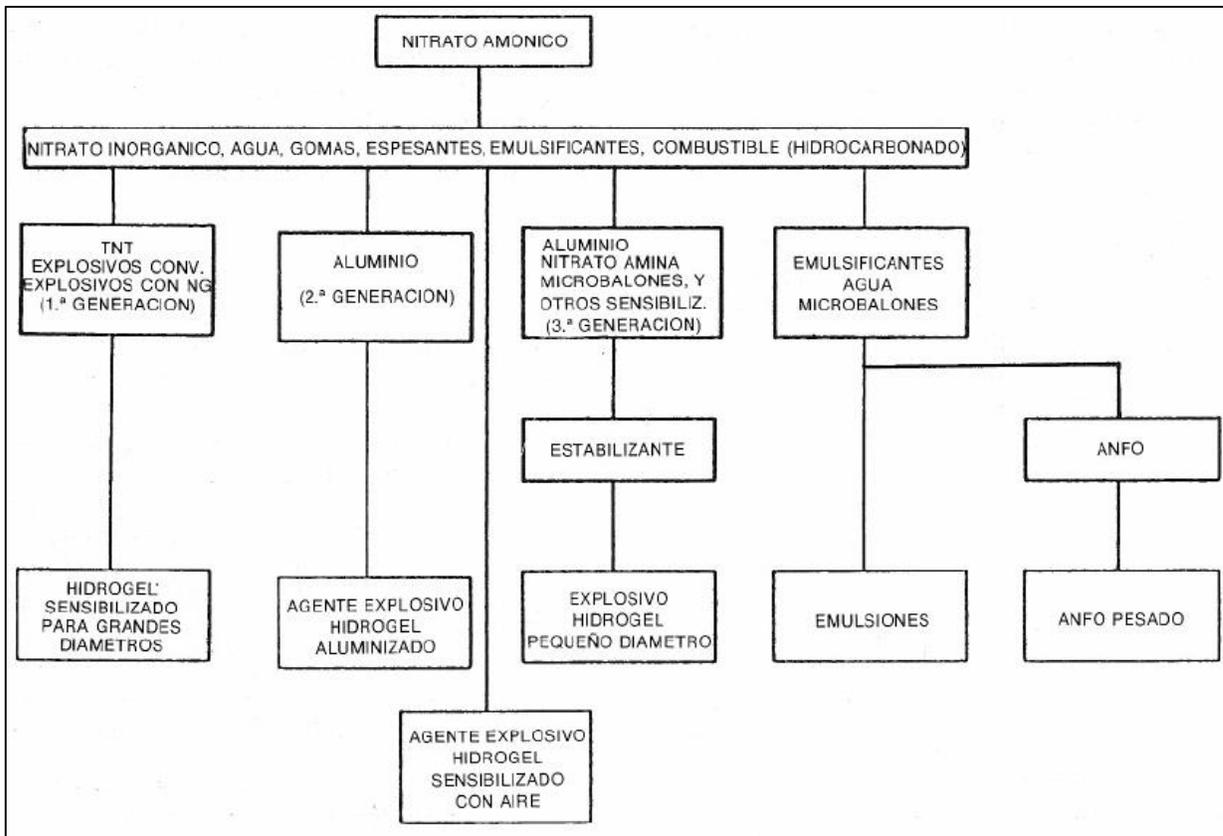


Figura 35. Agentes explosivos acuosos producidos a partir del NA.

El proceso de fabricación se basa en el mezclado de una solución de oxidantes con otra de nitrato de monometilamina (NMMA) y la adición de diversos productos sólidos y líquidos, tales como oxidantes, espesantes, gelatinizantes, etc. La solución de oxidantes está constituida por agua, nitrato amónico y nitrato sódico, a la que se aporta tio-urea y parte de las gomas que permiten conseguir una viscosidad alta para retener las burbujas de gas. El nitrato sódico tiene las ventajas de disponer de una gran cantidad de oxígeno y de disminuir el punto de cristalización de las soluciones salinas.

La solución de NMMA se prepara calentando los bidones en los cuales se transporta, ya que ésta se encuentra solidificada al tener un punto de cristalización entre los 33 y 39 [°C]. Este producto posee características bastante positivas como sensibilizante, pues es muy buen combustible con un balance de oxígeno muy negativo y alta densidad, y además es poco sensible a efectos dinámicos subsónicos de choques y roces. Las proporciones de NMMA en los hidrogeles oscilan entre el 10 y el 35%.

La mezcla de aditivos sólidos está formada por aluminio, almidón, gomas y otras sustancias en menor proporción. El aluminio aumenta proporcionalmente la sensibilidad de los hidrogeles y las gomas, y el almidón sirve para espesar las mezclas. En ocasiones se añaden compuestos capaces de formar enlaces cruzados que producen la gelatinización de los hidrogeles.

Para modificar la densidad se puede proceder a la gasificación química, generalmente con nitrito de sodio, o a la adición de productos de baja densidad, microesferas de vidrio, etc.

En cuanto a las características de los hidrogeles, ya que en su composición no se utilizan sensibilizantes intrínsecamente explosivos, poseen una seguridad muy alta tanto en su fabricación como en su manipulación. A pesar de esto, presentan una aptitud a la detonación muy buena que hacen que algunos hidrogeles puedan emplearse en calibres muy pequeños e iniciarse con detonadores convencionales.

La resistencia al agua es alta y la potencia, que es una característica fundamental de aplicación, es equivalente o superior a la de los explosivos convencionales, pudiendo ajustarse en función de la formulación del hidrogel. Las energías desarrolladas oscilan en el rango de las 700 a las 1.500 [cal/g].

La densidad puede también modificarse, desde 0,8 hasta 1,6 [g/cm³], partiendo de un valor básico comprendido entre 1,4 y 1,5. Mediante la adición de gasificantes químicos, como ya se ha indicado, o de aditivos de baja densidad puede reducirse tal parámetro. Esas disminuciones influyen sobre los explosivos haciendo que la velocidad de detonación aumente en muchos casos, así como su sensibilidad.

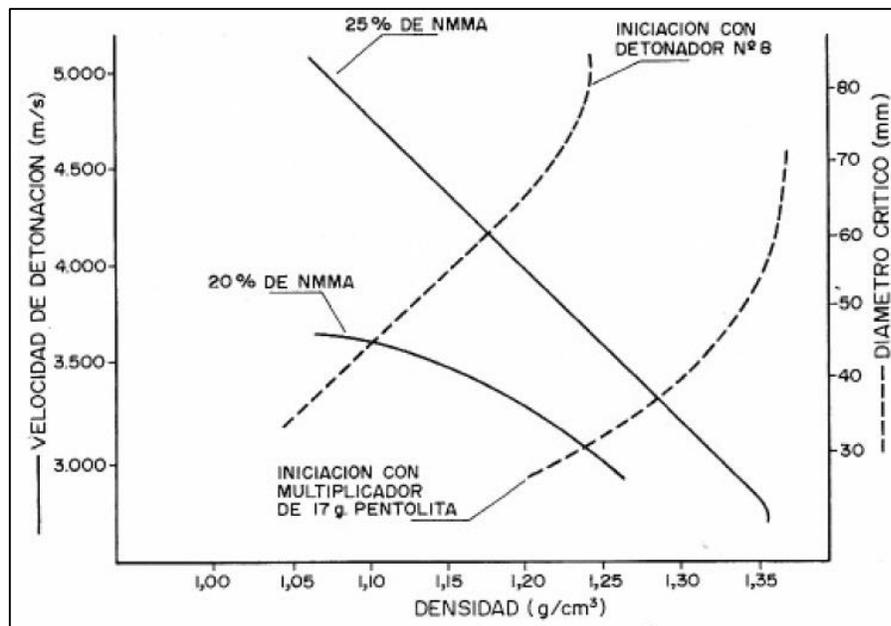


Figura 36. Influencia de la densidad de los hidrogeles sobre la velocidad de detonación y sensibilidad.

En lo referente a los humos de tronadura, los hidrogeles sensibilizados con aluminio presentan unas calidades de humo mejores que las obtenidas con explosivos convencionales. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

2.2.3 Emulsiones

Este grupo de explosivos, que es el de más reciente aparición en el mercado, mantiene las propiedades de los hidrogeles ya citados, pero a su vez mejora dos características fundamentales como son la potencia y la resistencia al agua.

Se necesitaba que se produjera el proceso de detonación combinando una sustancia oxidante con un aceite mineral. Estos constituyentes han permanecido químicamente invariables durante muchos años (nitrato amónico + gas-oil), pero, sin embargo, la forma física ha cambiado drásticamente.

En la tabla a continuación se resumen, en el orden cronológico de aparición de los explosivos, los oxidantes, combustibles y sensibilizadores empleados en la fabricación de cada uno de ellos.

Tabla 5. Oxidante, combustible, sensibilizante para cada explosivo.

Explosivo	Oxidante	Combustible	Sensibilizante
Dinamitas	SÓLIDO Nitratos	SÓLIDO Materias absorbentes (sensibilizantes)	LÍQUIDO Nitroglicerina Gasificantes
ANFOS	SÓLIDO Nitratos	LÍQUIDO Aceites	Poros
Hidrogeles	SÓLIDO/LÍQUIDO Nitratos Soluciones salinas	SÓLIDO/LÍQUIDO Aluminio Sensibilizante	SÓLIDO/LÍQUIDO TNT NMMA, MAN Aluminio en polvo Gasificantes
Emulsiones	LÍQUIDO Soluciones salinas	LÍQUIDO Aceites Parafinas	Gasificantes

Desde un punto de vista químico, una emulsión es un sistema bifásico en forma de una dispersión estable de un líquido inmiscible en otro.

Las emulsiones explosivas son del tipo denominado «agua en aceite» en las que la fase acuosa está compuesta por sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua y la fase aceitosa por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado.

El desarrollo de los explosivos ha llevado aparejado una reducción progresiva del tamaño de las partículas, pasando desde los sólidos a las soluciones salinas con sólidos y, por último, a las

microgotas de una emulsión explosiva, afectando la velocidad de detonación, reflejando la fuerte dependencia de la eficiencia de la reacción con el tamaño de las partículas.

Tabla 6. Dimensiones de los oxidantes en los explosivos (Bampffield y Morrey, 1984).

Explosivo	Tamaño [mm]	Estado	Velocidad de detonación [km/s]
ANFO	2	Sólido	3,2
Dinamita	0,2	Sólido	4,0
Hidrogel	0,2	Sólido/Líquido	3,3
Emulsión	0,001	Líquido	5,0-6,0

Se comprende así, que la dificultad de fabricación de las emulsiones se encuentra en la fase aceitosa pues, por imperativo del balance final de oxígeno, el 6% en peso de la emulsión, que es el aceite, debe englobar al 94% restante que se encuentra en forma de microgotas.

Para conseguir una sensibilización adecuada de los explosivos cuando éstos no contienen sensibilizantes químicos, sólidos o líquidos, se precisa un mecanismo físico como el de las burbujas de gas, que al ser comprimidas adiabáticamente producen el fenómeno de «Puntos Calientes» que favorecen tanto la iniciación como la propagación de la detonación.

En lo referente a los tipos de emulsión, bajo ese término quedan englobados productos de diferentes propiedades relacionadas con las características de la fase continua y su efecto sobre la viscosidad y consistencia.

Según el tipo de combustible, gas-oil, parafinas, gomas, etc., las características reológicas de las emulsiones son distintas, así como sus aplicaciones y métodos de empleo. También el tipo de agente emulsificante que se utilice para reducir la tensión superficial entre los dos líquidos inmiscibles y permitir la formación de la emulsión, puede ayudar a evitar los problemas de coagulación en grandes gotas de la solución de nitrato amónico, así como el fenómeno de cristalización de las sales.

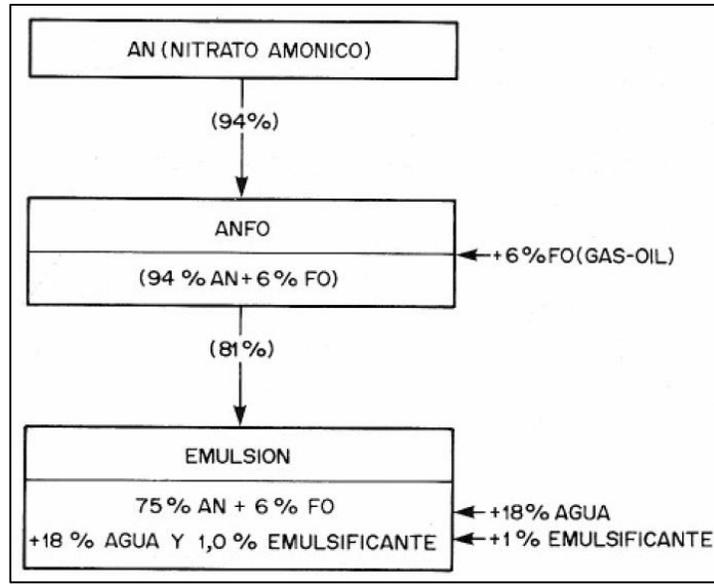


Figura 37. Composición básica de una emulsión.

Una emulsión básica se mezcla con los productos secos que se adicionan para ajustar la densidad o la potencia del explosivo. Esos productos sólidos pueden ser: aluminio en polvo, agentes gasificantes reductores de densidad, gránulos de nitrato amónico, etc.

El polvo de aluminio aunque aumenta la energía desarrollada por el explosivo tiene un efecto reductor de la velocidad de detonación. Por otro lado, la sensibilidad de la emulsión disminuye conforme aumenta la densidad, siendo necesario trabajar por encima del diámetro crítico y utilizar iniciadores potentes.

La tendencia actual hacia el empleo de las emulsiones en las operaciones de arranque con explosivos estriba en las numerosas ventajas que presentan:

- Menor precio, ya que en su fabricación no se precisa el uso de gomas y féculas de alto coste.
- Excelente resistencia al agua.
- Posibilidad de conseguir productos con densidades entre 1 y 1,45 [g/cm³].
- Elevadas velocidades de detonación, 4.000 a 5.000 [m/s], con poco efecto del diámetro de encartuchado.
- Gran seguridad de fabricación y manipulación.
- Posibilidad de mecanizar la carga y preparar mezclas con ANFO.

Por el contrario, los inconvenientes que plantean son los derivados de unas condiciones de preparación muy estrictas, la alterabilidad por las bajas temperaturas, la contaminación durante la carga si se utiliza a granel, el tiempo de almacenamiento y los períodos prolongados de transporte. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

2.2.4 ANFO Pesado

En la tecnología actual de tronaduras es incuestionable que el ANFO constituye el explosivo básico. Diversos intentos se han dirigido hacia la obtención de una mayor energía de este explosivo, desde la trituración de los prills de nitrato amónico de alta densidad hasta el empleo de combustibles líquidos de alta energía, como las nitroparafinas, el metanol y el nitropropano, pero comercialmente no han prosperado.

El ANFO Pesado, que es una mezcla de emulsión base con ANFO, abre una nueva perspectiva en el campo de los explosivos. El ANFO presenta unos huecos intersticiales que pueden ser ocupados por un explosivo líquido como la emulsión que actúa como una matriz energética.

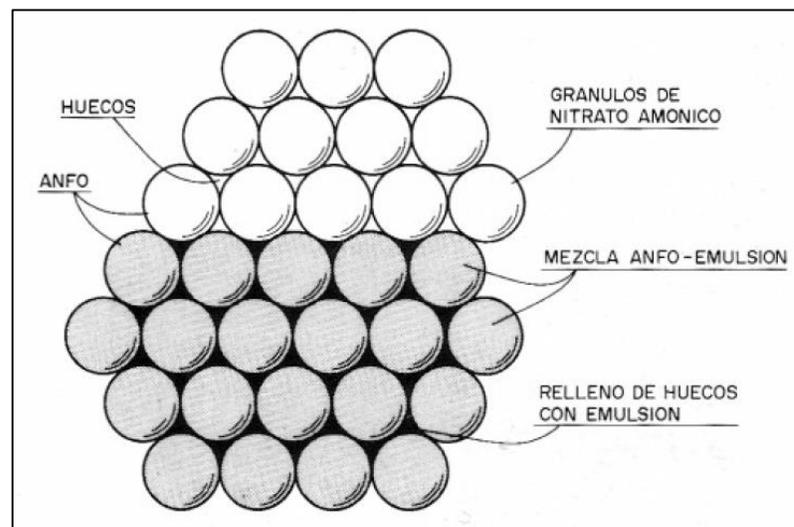


Figura 38. Estructura del ANFO Pesado.

Aunque las propiedades de este explosivo dependen de los porcentajes de mezcla, las ventajas principales que presenta son:

- Mayor energía
- Mejores características de sensibilidad
- Gran resistencia al agua
- Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del pozo.

La fabricación es relativamente fácil, pues la matriz emulsión puede ser preparada en una planta fija y transportada en un camión cisterna hasta un depósito de almacenamiento o ser bombeada a un camión mezclador. Con estos camiones pueden prepararse in-situ las mezclas de emulsión con nitrato amónico y gas-oil en las proporciones adecuadas a las condiciones de trabajo.

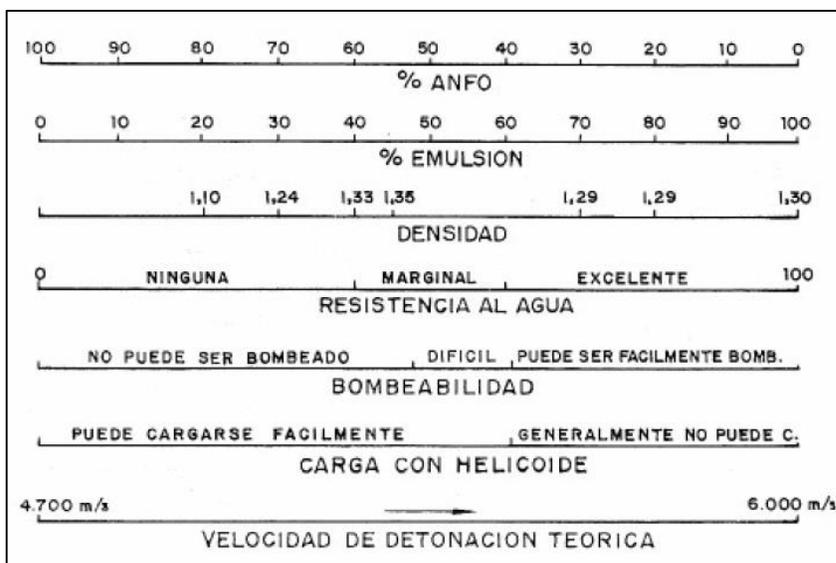


Figura 39. Características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de ANFO Pesado (Du Pont, 1986).

A continuación se observa la variación de la Potencia Relativa en Volumen (ANFO = 100) en un ANFO Pesado en función del porcentaje de emulsión. Se observa que cuando la matriz de emulsión aumenta por encima del 40% la potencia disminuye debido a que la separación de las partículas de ANFO resulta elevada para que éstas actúen eficientemente como puntos calientes y propagadoras de la onda de choque.

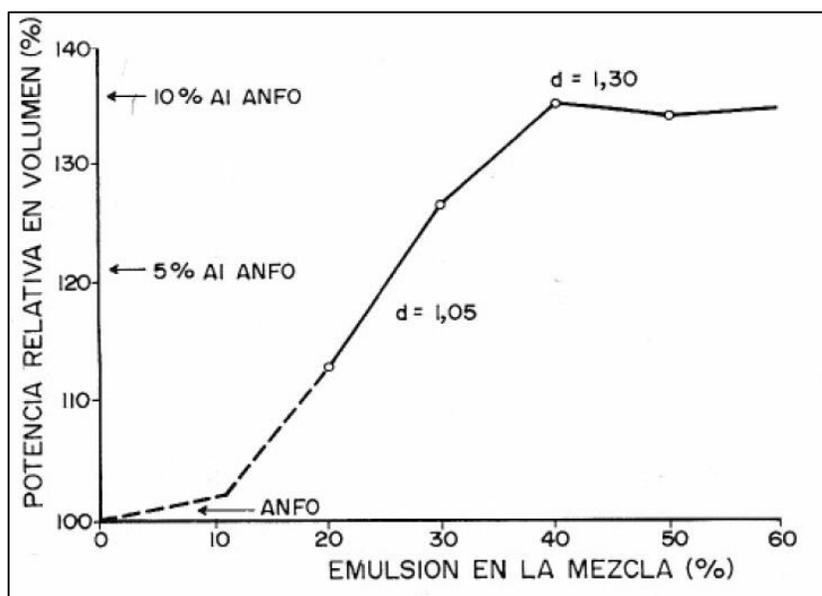


Figura 40. Variación de la potencia y densidad de un ANFO Pesado según el porcentaje de emulsión (Bampffield y Morrey, 1984).

La densidad de la mezcla aumenta con el porcentaje de emulsión, alcanzándose la energía máxima para un valor de ésta de 1,3 [g/cm³] aproximadamente.

En la siguiente figura se indica la variación de la sensibilidad del ANFO Pesado conforme aumenta el porcentaje de emulsión. La sensibilidad disminuye al incrementarse la densidad, siendo necesario cada vez un iniciador de mayor peso. Para una densidad de 1,33 [g/cm³] se necesita un multiplicador de Pentolita de 450 [g] como mínimo.

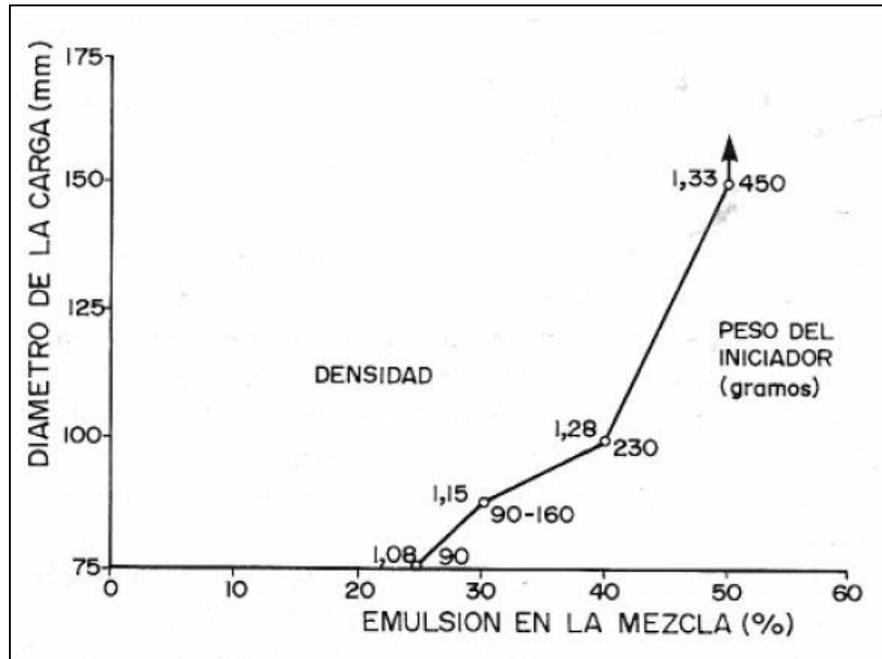


Figura 41. Variación de la sensibilidad del ANFO Pesado con el porcentaje de emulsión de la mezcla (Bampffield y Morrey, 1984).

Con la reciente aceptación del ANFO Pesado en la industria, esos mismos explosivos pero aluminizados hacen posible pensar en una mejora de la eficiencia de las operaciones y ahorro de costes, al tratarse de productos de una alta potencia volumétrica y con un precio relativamente bajo. El aluminio incrementa la energía total producida, la potencia relativa en volumen, la temperatura y la presión de detonación.

En la tabla que se presenta a continuación se recoge las potencias del ANFO, las emulsiones y diversos ANFOS Pesados preparados a partir de nitrato amónico poroso de baja densidad, y distintos porcentajes de aluminio. La reacción del aluminio durante la detonación da lugar a la formación de óxidos sólidos y no productos gaseosos. El volumen de gas que se genera por el explosivo es, por esto, reducido. El calor de formación de los óxidos de aluminio es muy alto, 16.260 [kJ/kg], resultando una ganancia considerable del calor de explosión que aumenta la temperatura de los gases. Este aumento de la temperatura ayuda a reducir el volumen de los gases, desarrollando éstos un mayor trabajo al estar más calientes. La adición de aluminio facilita el desarrollo de una mayor cantidad de trabajo para una misma cantidad de explosivo, pudiéndose entonces aumentar la piedra y el espaciamiento de los esquemas, mientras que se mejora la fragmentación resultante de las tronaduras.

Tabla 7. Tipos de Explosivos y sus respectivas PRP Y PRV.

Explosivo	Densidad [g/cm ³]	Potencia Relativa en Peso (ANFO = 100)	Potencia Relativa en Volumen respecto al ANFO de 0,65 [g/m ³] (ANFO = 1,00)
ANFO	0,85	100	1,00
AL/ANFO (5% Al)	0,88	112	1,16
AL/ANFO (10% Al)	0,91	123	1,32
AL/ANFO (15% Al)	0,94	134	1,48
NCN EMULSIÓN (0% Al)	1,15	78	1,06
NCN EMULSIÓN (5% Al)	1,21	91	1,30
NCN EMULSIÓN (10% Al)	1,27	103	1,54
NCN EMULSIÓN (15% Al)	1,30	117	1,79
ANFO + 10% EMULSIÓN (0% Al)	0,93	98	1,07
ANFO + 20% EMULSIÓN (0% Al)	1,01	96	1,14
ANFO + 30% EMULSIÓN (0% Al)	1,11	93	1,21
ANFO + 40% EMULSIÓN (0% Al)	1,20	91	1,28
ANFO + 50% EMULSIÓN (0% Al)	1,29	89	1,35
ANFO + 30% EMULSIÓN (5% Al)	1,14	105	1,41
ANFO + 30% EMULSIÓN (10% Al)	1,16	116	1,58
ANFO + 30% EMULSIÓN (15% Al)	1,19	127	1,78

La figura siguiente permite definir la composición óptima de un explosivo para obtener una potencia dada. Las potencias relativas en volumen con respecto al ANFO varían entre 1,0 y 1,9. (Manual de perforación y voladura de rocas [4], 2003)

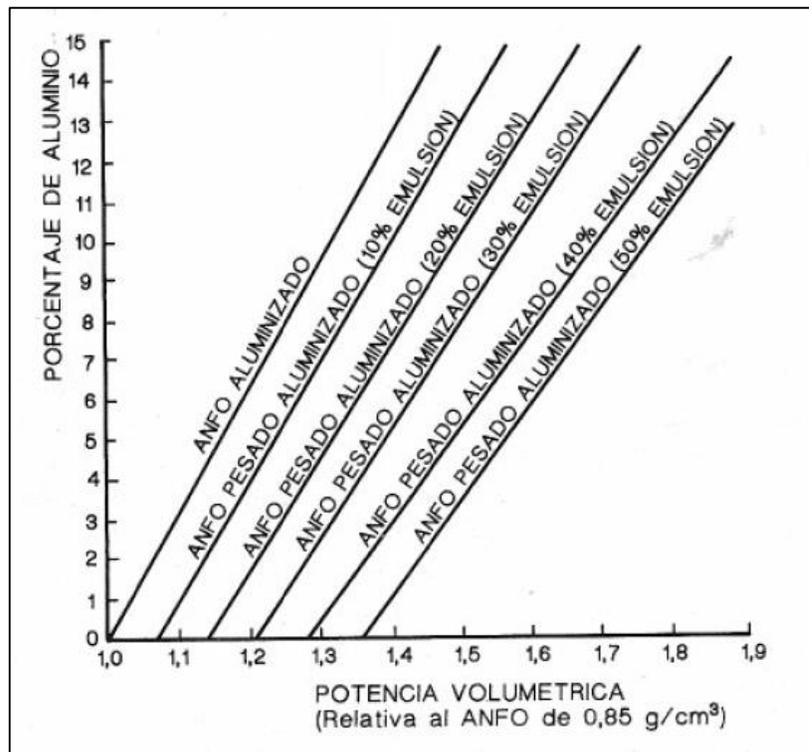


Figura 42. Potencias relativas obtenidas con diversos porcentajes de aluminio contenido en ANFOS Pesados.

2.2.5 Explosivos utilizados y por utilizar en la minera El Abra

Primero se tienen distintos sistemas de manejo de explosivos, se clasifican en explosivos empaquetados y explosivos a granel, dentro de estos últimos existe una gran variedad de explosivos, los relevantes para el análisis se definen a continuación y se entregan características de los explosivos utilizados y a utilizar, donde el porcentaje de uso de estos explosivos en 186 tronaduras realizadas entre el periodo jueves 1 de enero de 2015 hasta el 4 de octubre de 2015 se presenta a continuación de manera de tener representatividad como caso base para efectos de análisis posteriores:

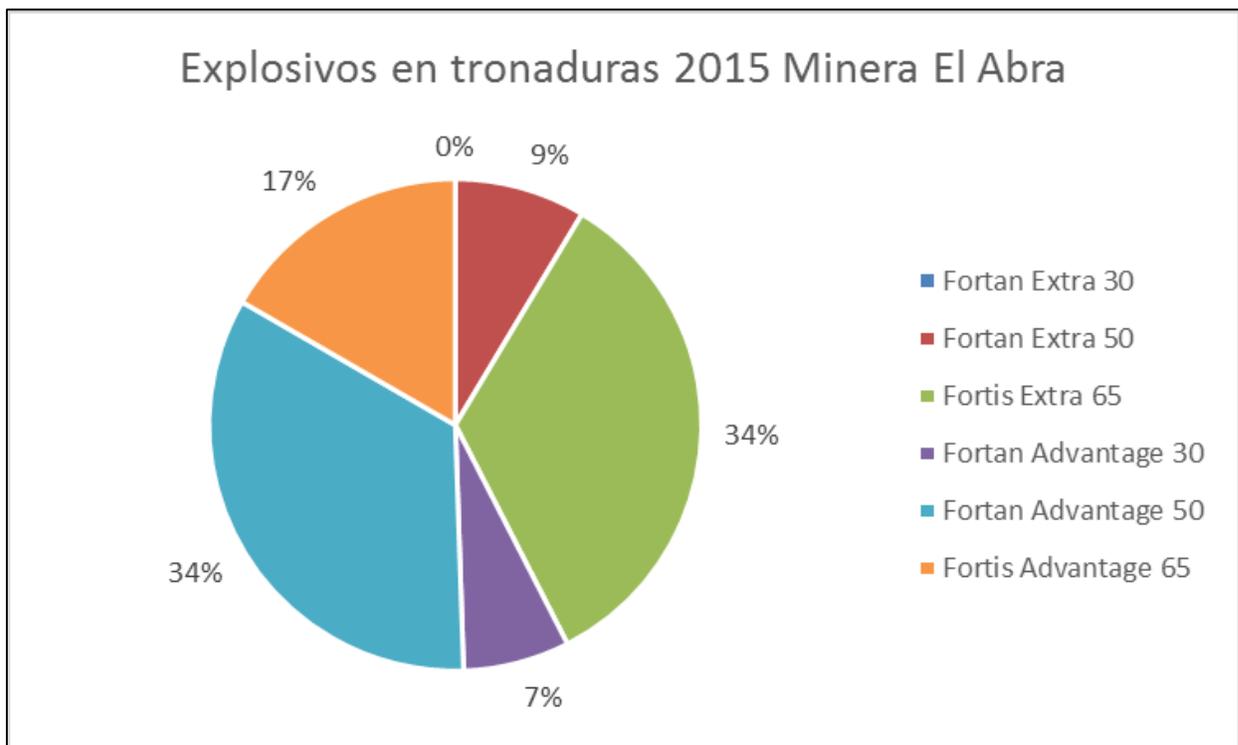


Figura 43. Porcentaje de utilización de explosivos en tronaduras periodo 2015.

Donde cabe recalcar que 63 tronaduras fueron cargadas con Fortis Extra 65 de las cuales 38 poseen la misma dimensión de malla, forma de carguío y explosivo que el caso base, de manera de generar representatividad.

- **Fortan Advantage 50:** Explosivo utilizado de forma regular en la minera El Abra, es un sistema de emulsión a granel de ANFO pesado específicamente diseñado para aplicaciones de tronaduras difíciles presentes en rocas duras en minería a cielo abierto. Está diseñado para aumentar la energía explosiva en pozos secos, sin embargo, la mezcla de emulsiones de más alta densidad Fortan Advantage 50 está químicamente sensibilizado y puede ser

usado en pozos desaguados. No se aconseja para terrenos que presentan sulfuro reactivo. (Orica Mining Services [6], 2012)

Se considera un precio de 592,93 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

Se pueden mencionar algunos beneficios de este explosivo (Orica Mining Services [6], 2012):

- Es confiable en pozos secos y desaguados.
- Las altas densidades de Fortan Advantage maximizan la fragmentación y desplazamiento de las pilas del material volado, para mejorar la productividad del sistema de mina a chancador.
- El producto integrado y los sistemas de entrega, de los sistemas a granel Fortan Advantage aseguran exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- Puede ser cargado a distintas densidades y energías dentro de cada pozo.
- La elevada fuerza en volumen permite la expansión de los patrones de tronadura y reduce costo de perforación y tronadura.
- La tasa de producción por sobre los 400 [kg/min], permite una alta entrega de productividad en el banco.

Tabla 8. Propiedades técnicas Fortan Advantage 50. (Orica Mining Services [6], 2012)

Sistema Fortan Advantage 50	
Densidad ¹ [g/cm ³]	1,25-1,38
Diámetro mínimo pozos [mm]	150
Profundidad máxima pozos [m]	30
Máxima longitud de carga [m]	25
Tipo de pozos	Seco/desaguado
Sistema de cargado	Vaciado
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el Diámetro mínimo del pozo	Pentex AP de 450g
VOD típico ² [km/s]	3,2-6,4
Energía relativa efectiva (REE)³	
Fuerza Relativa en peso	118-120
Fuerza Relativa en volumen	204-207
Emisión CO ₂ ⁴ [kg/ton]	149
Tiempo de Espera [Días]	7

- **Fortan Extra 50:** Explosivo utilizado de forma regular en la minera El Abra, es un sistema de emulsión a granel de ANFO pesado específicamente diseñado para aplicaciones de tronaduras difíciles presentes en rocas duras en minería a cielo abierto. El rango de alta energía que posee en pozos secos permite mayor expansión y resultando en una reducción de costos de perforación.

Está disponible en un rango de energías y densidades que permite ajustar el desempeño del explosivo con el tipo de terreno y los requerimientos de la aplicación.

¹ Solamente densidad nominal.

² La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del pozo y el grado de confinamiento.

³ REE es la energía relativa al ANFO, a una densidad de 0,8 [g/cm³]. El ANFO tiene una energía efectiva de 2,3 [MJ/kg]. Las energías acotadas están basadas en cálculos de detonación teóricos, tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en un pozo, tales como diámetro del pozo, tipo de roca y sus características y comportamiento de la reacción del explosivo. Los cálculos usan una presión de corte de 100 [MPa].

⁴ El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.

No se aconseja para terrenos que presentan sulfuro reactivo. Una incorrecta aplicación de este explosivo puede resultar en elevados niveles de gases indeseables post tronadura. (Orica Mining Services [7], 2010)

Se considera un precio de 713,63 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

Se pueden mencionar algunos beneficios de este explosivo (Orica Mining Services [7], 2010):

- Está diseñado para dar mayor tiempo de espera en los pozos y aumentar la confianza en pozos secos y desaguados.
- Entrega excelente desempeño en tronadura en las más difíciles condiciones secas y desaguadas.
- El producto integrado y los sistemas de entrega de los sistemas a granel aseguran exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- Las altas densidades que posee maximizan la fragmentación y desplazamiento de las pilas del material volado, para mejorar la productividad del sistema de mina a chancador.
- La elevada fuerza en volumen permite la expansión de los patrones de tronadura y reduce costo de perforación y tronadura.
- La tasa de producción por sobre los 750 [kg/min], permite una alta entrega de productividad en el banco.

Tabla 9. Propiedades técnicas Fortan Extra 50 (Orica Mining Services [7], 2010)

Sistema Fortan Extra 50	
Densidad ⁵ [g/cm ³]	1,20-1,30
Diámetro mínimo pozos [mm]	126
Profundidad máxima pozos [m]	80
Máxima longitud de carga [m]	75
Tipo de pozos	Seco/desaguado
Sistema de cargado	Vaciado
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el Diámetro mínimo del pozo	PPP
VOD típico ⁶ [km/s]	3,3-6,7
Energía relativa efectiva (REE)⁷	
Fuerza Relativa en peso	124
Fuerza Relativa en volumen	194
Emisión CO ₂ ⁸ [kg/ton]	160
Tiempo de Espera [Días]	42

- **Fortis Extra 65:** Explosivo utilizado de forma regular en la minera El Abra, es un sistema de emulsión bombeable sensibilizada el cual está específicamente diseñado para aplicaciones de tronaduras con agua.

El sistema Fortis Extra complementa el rango de productos para pozos secos Fortan Extra de Orica Mining Services.

Ha sido específicamente diseñado para ser usado en minería a cielo abierto, y es apropiado para las situaciones más difíciles de tronaduras. Puede ser usado dondequiera que se encuentren pozos con agua. No se aconseja para terrenos contaminados con sulfuros reactivos. (Orica Mining Services [8], 2012)

⁵ Solamente densidad nominal.

⁶ La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del pozo y el grado de confinamiento.

⁷ REE es la energía relativa al ANFO, a una densidad de 0,8 [g/cm³]. El ANFO tiene una energía efectiva de 2,3 [MJ/kg]. Las energías acotadas están basadas en cálculos de detonación teóricos, tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en un pozo, tales como diámetro del pozo, tipo de roca y sus características y comportamiento de la reacción del explosivo. Los cálculos usan una presión de corte de 100 [MPa].

⁸ El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.

Se considera un precio de 757,11 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

Se pueden mencionar algunos beneficios de este explosivo (Orica Mining Services [8], 2012):

- Está diseñado para aumentar el tiempo de espera en los pozos y aumentar la confianza en pozos secos y con aguas.
- Es elaborado y entregado con un preciso control de las tasas para mejorar su productividad.
- El producto integrado y los sistemas de entrega de los sistemas a granel aseguran exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- Puede ser cargado para variar la energía y densidad, para maximizar la fragmentación y desplazamiento mejorando la productividad mina a chancador.
- Proporciona una carga explosiva completamente acoplada para maximizar los resultados de las tronaduras.

Tabla 10. Propiedades técnicas Fortis Extra 65. (Orica Mining Services [8], 2012)

Sistema Fortis Extra 65	
Densidad ⁹ [g/cm ³]	1,20-1,30
Diámetro mínimo pozos [mm]	76
Profundidad máxima pozos [m]	30
Máxima longitud de carga [m]	25
Tipo de pozos	Secos, con agua o desaguados
Sistema de cargado	Bombeado
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el Diámetro mínimo del pozo	Pentex CD de 450 g
VOD típico ¹⁰ [km/s]	3,0-5,8
Energía relativa efectiva (REE)¹¹	
Fuerza Relativa en peso	92
Fuerza Relativa en volumen	136
Emisión CO ₂ ¹² [kg/ton]	152
Tiempo de Espera [Días]	7

- **Fortis Advantage 65:** Explosivo utilizado de forma regular en la minera El Abra, es un sistema de emulsión bombeable sensibilizada el cual está diseñado para aplicaciones de tronaduras con agua.

Ha sido específicamente adaptado para uso en minería a cielo abierto de roca dura. Puede ser usado dondequiera que se encuentren pozos con agua. No se aconseja para terrenos contaminados con sulfuros reactivos. (Orica Mining Services [9], 2012)

Se considera un precio de 608,41 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

⁹ Solamente densidad nominal.

¹⁰ La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del pozo y el grado de confinamiento.

¹¹ REE es la energía relativa al ANFO, a una densidad de 0,8 [g/cm³]. El ANFO tiene una energía efectiva de 2,3 [MJ/kg]. Las energías acotadas están basadas en cálculos de detonación teóricos, tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en un pozo, tales como diámetro del pozo, tipo de roca y sus características y comportamiento de la reacción del explosivo. Los cálculos usan una presión de corte de 100 [MPa].

¹² El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.

Se pueden mencionar algunos beneficios de este explosivo (Orica Mining Services [9], 2012):

- Es confiable en pozos secos y con agua.
- El producto integrado y los sistemas de entrega de los sistemas a granel aseguran exactitud, productividad y confiabilidad en el suministro.
- Puede ser cargado para variar la energía y densidad, para maximizar la fragmentación y desplazamiento mejorando la productividad mina a chancador.
- Proporciona una carga explosiva completamente acoplada para maximizar los resultados de las tronaduras.

Tabla 11. Parámetros técnicos Fortis Advantage 65. (Orica Mining Services [9], 2012)

Sistema Fortis Advantage 65	
Densidad ¹³ [g/cm ³]	1,20-1,30
Diámetro mínimo pozos [mm]	89
Profundidad máxima pozos [m]	30
Máxima longitud de carga [m]	25
Tipo de pozos	Secos, con agua o desaguados
Sistema de cargado	Bombeado
Tipo de iniciador Pentex recomendado para el Diámetro mínimo del pozo	Pentex CD de 450g
VOD típico ¹⁴ [km/s]	3,7-6,5
Energía relativa efectiva (REE)¹⁵	
Fuerza Relativa en peso	107
Fuerza Relativa en volumen	167
Emisión CO ₂ ¹⁶ [kg/ton]	133
Tiempo de Espera [Días]	21

¹³ Solamente densidad nominal.

¹⁴ La VOD real depende de las condiciones de uso incluyendo el diámetro del pozo y el grado de confinamiento.

¹⁵ REE es la energía relativa al ANFO, a una densidad de 0,8 [g/cm³]. El ANFO tiene una energía efectiva de 2,3 [MJ/kg]. Las energías acotadas están basadas en cálculos de detonación teóricos, tomando en consideración factores que influyen en el desempeño en un pozo, tales como diámetro del pozo, tipo de roca y sus características y comportamiento de la reacción del explosivo. Los cálculos usan una presión de corte de 100 [MPa].

¹⁶ El dióxido de carbono es el principal gas productor del efecto invernadero. Esta información supone una detonación ideal.

- **Vistis 225**: Corresponde a una emulsión bombeable dopada de alto poder energético para pozos con agua (es decir, bombeables). Posee densidades de 1,25 a 1,35 [g/cm³] con una energía relativa al ANFO de 139% en peso y 225% en volumen (Orica Mining Services [1], 2015). Además es de similar composición al Extra, solo que posee 6% de Aluminio.

Se considera un precio de 1.234,94 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

Contempla los siguientes beneficios y aplicaciones (Orica Mining Services [1], 2015):

- Son los productos explosivos, del tipo bombeable, de mayor poder energético disponible en la industria hasta el momento. Especialmente diseñado para ser usado en pozos de alto contenido de agua.
 - De rendimiento confiable en aplicaciones de tronaduras difíciles.
 - Para obtener altos grados de fragmentación y mayor generación de finos.
- **Vistan 225**: Es un ANFO pesado de alto poder energético, para pozos desaguados y secos (vaciados). Posee densidades de 1,25 a 1,35 [g/cm³] con una energía relativa al ANFO de 141% en peso y 225% en volumen. (Orica Mining Services [1], 2015)

Se considera un precio de 1.189,64 [USD/TM] para este explosivo. (Orica Mining Services [10], 2015)

Contempla los siguientes beneficios y aplicaciones (Orica Mining Services [1], 2015):

- Son los productos explosivos, del tipo vaciables, de mayor poder energético disponible.
- De rendimiento confiable en aplicaciones de tronaduras difíciles.
- Para obtener altos grados de fragmentación y mayor generación de finos.

2.3 Propiedades de los explosivos

Los explosivos convencionales y los agentes explosivos poseen propiedades diferenciadoras que los caracterizan y que se aprovechan para la correcta selección, atendiendo al tipo de tronadura que se desea realizar y las condiciones en que se debe llevar a cabo.

Las propiedades de cada grupo de explosivos permiten además predecir cuáles serán los resultados de fragmentación, desplazamiento y vibraciones más probables.

Las características más importantes son: potencia y energía desarrollada, velocidad de detonación, densidad, presión de detonación, resistencia al agua y sensibilidad.

Otras propiedades que afectan al empleo de los explosivos y que es preciso tener en cuenta son: los humos, la resistencia a bajas y altas temperaturas, la desensibilización por acciones externas, etc. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.1 Potencia y Energía

La potencia es, desde el punto de vista de aplicación industrial, una de las propiedades más importantes, ya que define la energía disponible para producir efectos mecánicos.

Existen diferentes formas de expresar la potencia (Strength) de un explosivo. En las antiguas dinamitas (Straight dynamites) era el porcentaje de nitroglicerina el parámetro de medida de la potencia. Posteriormente, con la sustitución parcial de la nitroglicerina por otras sustancias, y la realización de ensayos comparativos de laboratorio, se pasó a hablar de Potencia Relativa por Peso (Relative Weight Strength) y Potencia Relativa por Volumen (Relative Bulk Strength). Así, es frecuente referir la potencia de un explosivo en tantos por ciento de otro que se toma como patrón, Goma pura, ANFO, etc., al cual se le asigna el valor 100. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.2 Velocidad de Detonación

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía.

Los factores que afectan a la velocidad de detonación son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento, la iniciación y el envejecimiento del explosivo. Para los tres primeros, conforme aumentan dichos parámetros las "VD" resultantes crecen significativamente.

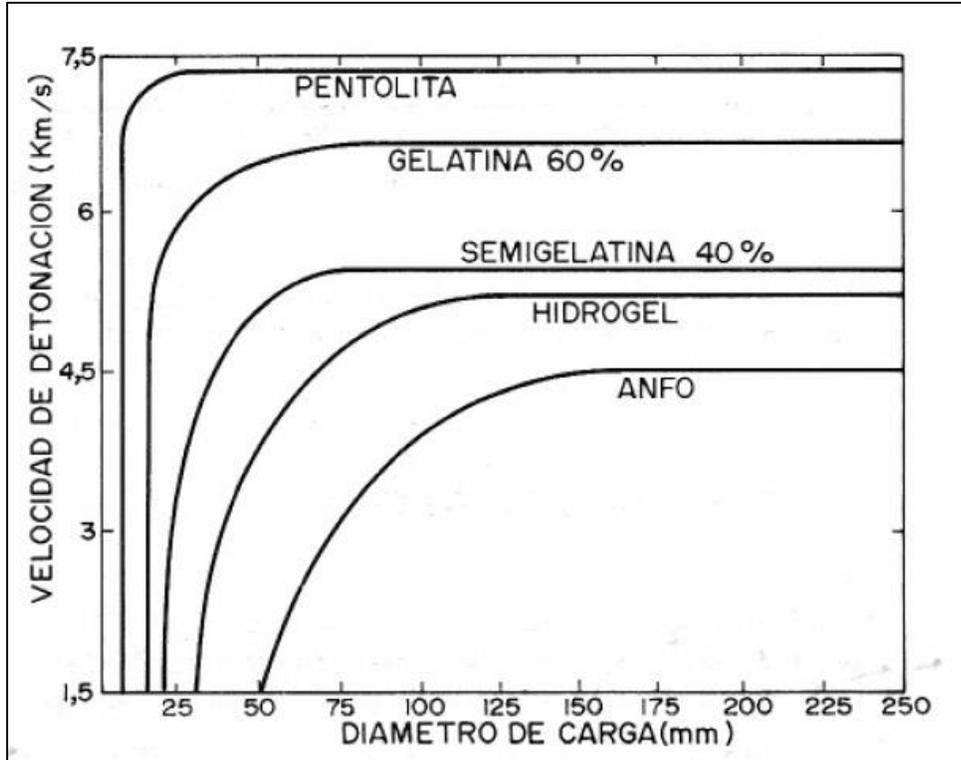


Figura 44. Influencia del diámetro de la carga sobre la velocidad de detonación (Ash, 1977). (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

En cuanto a la iniciación, si no es lo suficientemente energética puede hacer que el régimen de detonación comience con una velocidad baja, y con respecto al envejecimiento, éste hace que la "VD" también disminuya al reducirse el número y volumen de las burbujas de aire, sobre todo en los explosivos gelatinosos, ya que son generadores de puntos calientes. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.3 Densidad

La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0,8 y 1,6 [g/cm³], y al igual que con la velocidad de detonación cuanto mayor es, más intenso es el efecto rompedor que proporciona.

En los agentes explosivos la densidad puede ser un factor crítico, pues si es muy baja se vuelven sensibles al cordón detonante que los comienza a iniciar antes de la detonación del multiplicador o cebo, o de lo contrario, si es muy alta, pueden hacerse insensibles y no detonar.

La densidad de un explosivo es un factor importante para el cálculo de la cantidad de carga necesaria para una tronadura. Por regla general, en el fondo de los pozos, que es donde se necesita mayor concentración de energía para el arranque de la roca, se utilizan explosivos más densos, como son los gelatinosos e hidrogeles, mientras que en las cargas de columna se requieren explosivos menos densos; como son los pulverulentos y los de base ANFO. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.4 Presión de Detonación

La presión de detonación de un explosivo es función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación.

Los explosivos comerciales tienen una presión de detonación que varía entre 500 y 1,500 [MPa]. Generalmente, en rocas duras y competentes la fragmentación se efectúa más fácilmente con explosivos de alta presión de detonación, debido a la directa relación que existe entre esta variable y los mecanismos de rotura de la roca. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.5 Estabilidad

Los explosivos deben ser químicamente estables y no descomponerse en condiciones ambientales normales. Un método de probar la estabilidad es mediante la prueba Abel, que consiste en el calentamiento de una muestra durante un tiempo determinado y a una temperatura específica, observando el momento en que se inicia su descomposición.

La estabilidad es una de las propiedades que está relacionada con el tiempo máximo de almacenamiento de dichas sustancias para que éstas no se vean mermadas en los efectos desarrollados en las tronaduras. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.6 Resistencia al Agua

Capacidad para resistir una prolongada exposición al agua sin perder sus características. Varía de acuerdo con la composición del explosivo y está vinculada a la proporción de nitroglicerina o aditivos especiales que contengan, así las gomas, los hidrogeles y las emulsiones son muy resistentes al agua. Las sales oxidantes, como el nitrato amónico en el ANFO, disminuyen intensamente la resistencia al agua pues son muy higroscópicas.

La escala de clasificación generalmente aceptada va desde: Nula, Limitada, Buena, Muy Buena y Excelente. En la primera, el explosivo no tiene ninguna resistencia al agua, mientras que la última, garantiza una exposición superior a 12 horas. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.7 Sensibilidad

Esta característica engloba varios significados dependiendo del tipo de acción exterior que se produzca sobre el explosivo. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

- **Acción controlada:** La sensibilidad aquí es equivalente a la aptitud a la detonación por un iniciador (Por ejemplo, un detonador).
- **Acción incontrolada:** La sensibilidad es una medida de la facilidad con la que un explosivo puede ser detonado por calor, fricción, impacto o choque.

2.3.8 Transmisión de la detonación

La transmisión por «*simpatía*» es el fenómeno que se produce cuando un explosivo al detonar induce en otro próximo su explosión.

Una buena transmisión dentro de los pozos es la garantía para conseguir la completa detonación de las columnas de explosivo. Pero cuando esos pozos se hallan próximos o las cargas dentro de ellos se diseñan espaciadas, se puede producir la detonación por simpatía por medio de la transmisión de la onda de tensión a través de la roca, por la presencia de aguas subterráneas y discontinuidades estructurales o por la propia presión del material inerte de los retacados intermedios sobre las cargas adyacentes. En todos estos casos los resultados de fragmentación y vibraciones se verán perjudicados seriamente.

En la mayoría de los explosivos industriales las distancias máximas hasta las que se produce la detonación por simpatía están entre 2 y 8 veces su diámetro, dependiendo del tipo de explosivo.

Los factores que modifican la transmisión de la detonación del explosivo son: el envejecimiento y el calibre de los cartuchos. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.9 Desensibilización

En muchos explosivos industriales, se ha observado que la sensibilidad disminuye al aumentar la densidad por encima de un determinado valor. Este fenómeno, es más acusado en aquellas composiciones o agentes explosivos que no contienen sustancias como el TNT, la Nitroglicerina, etc.

Para los hidrogeles y las mezclas tipo ANFO la variación de sensibilidad con la densidad es mucho mayor que para los explosivos gelatinosos.

En la figura a continuación se observa la influencia de la densidad del ANFO sobre la «VD». Por encima de valores de 1,1 [g/cm³] la velocidad cae drásticamente, por lo que a las densidades y a las presiones que producen esos niveles de confinamiento se las denominan como «*Densidades y Presiones de Muerte*».

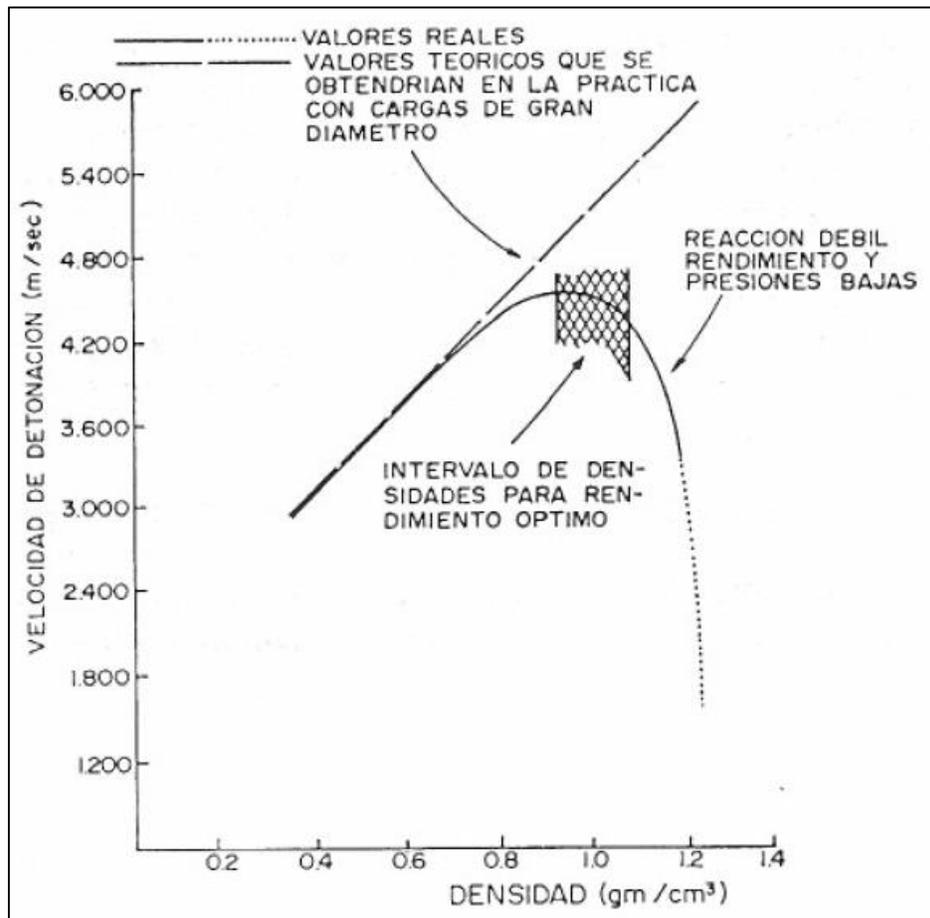


Figura 45. Velocidad de detonación del ANFO en función de la densidad. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

La desensibilización puede estar producida por:

- Presiones hidrostáticas.
- Presiones dinámicas.

El primer caso sólo se suele presentar en pozos muy profundos y no es por esto muy frecuente. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.10 Resistencias a las bajas temperaturas

Cuando la temperatura ambiente se encuentre por debajo de los 8 [°C], los explosivos que contienen nitroglicerina tienden a congelarse, por lo que se suele añadir una cierta cantidad de nitroglicol que hace bajar el punto de congelación a unos -20°C. (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.3.11 Humos

La detonación de todo explosivo comercial produce vapor de agua, nitrógeno, dióxido de carbono, y eventualmente, sólidos y líquidos. Entre los gases inocuos citados existe siempre cierto porcentaje de gases tóxicos como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. Al conjunto de todos esos productos resultantes se le designa por «*humos*». (Manual de perforación y voladura de rocas [5], 2003)

2.4 Fragmentación

Para poder determinar la fragmentación ocasionada por los distintos explosivos a aplicar y así realizar una comparación de resultados, es necesario conocer los distintos modelos predictivos de fragmentación que existen, estos modelos generalmente son del tipo matemáticos y empíricos, para estos se tienen los siguientes:

2.4.1 Fórmula de Larsson

La ecuación propuesta por Larsson (1973) para la determinación del K50, o abertura de malla cuadrada por la que pasa el 50% del material tronado es:

$$K50 = s * e^{(0,58 * \ln B - 0,145 * \ln (\frac{S}{B}) - 1,18 * \ln (\frac{CE}{C}) - 0,82)}$$

Ecuación 4. Ecuación de Larsson

donde:

B = Burden [m].

S/B = Relación espaciamento-burden.

CE = Consumo específico de explosivo [kg/m³].

C = Constante de roca. Equivale al consumo específico de explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca, normalmente varía entre 0,3 y 0,5 [kg/m³].

s = Constante de Volabilidad. Es un factor que tiene en cuenta la heterogeneidad y discontinuidades del macizo rocoso.

Roca muy fisurada y diaclasas muy próximas; s = 0,60

Roca diaclasada; s = 0,55

Roca normal con algunas grietas; s = 0,50

Roca relativamente homogénea; s = 0,45

Roca homogénea; s = 0,40

Con los ábacos presentados a continuación puede estimarse además del K50, las curvas granulométricas teóricas del material volado, a partir de un diseño de tronadura, o proceder a la inversa determinando dicho diseño partiendo de una fragmentación deseada. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

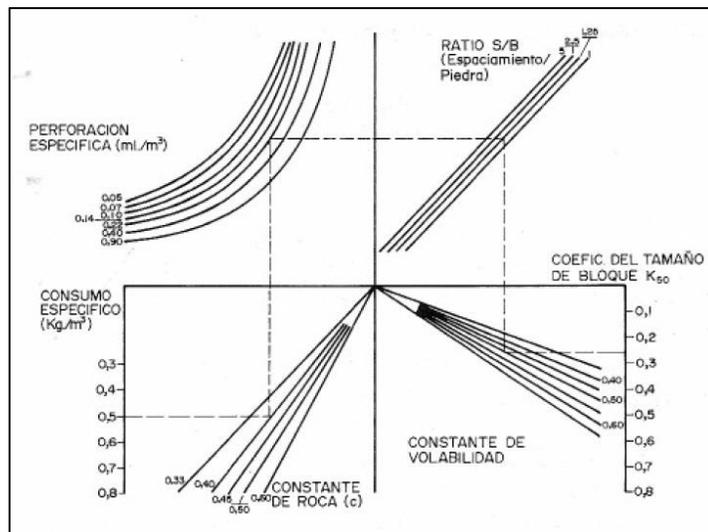


Figura 46. Nomograma para la determinación del tamaño del bloque. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

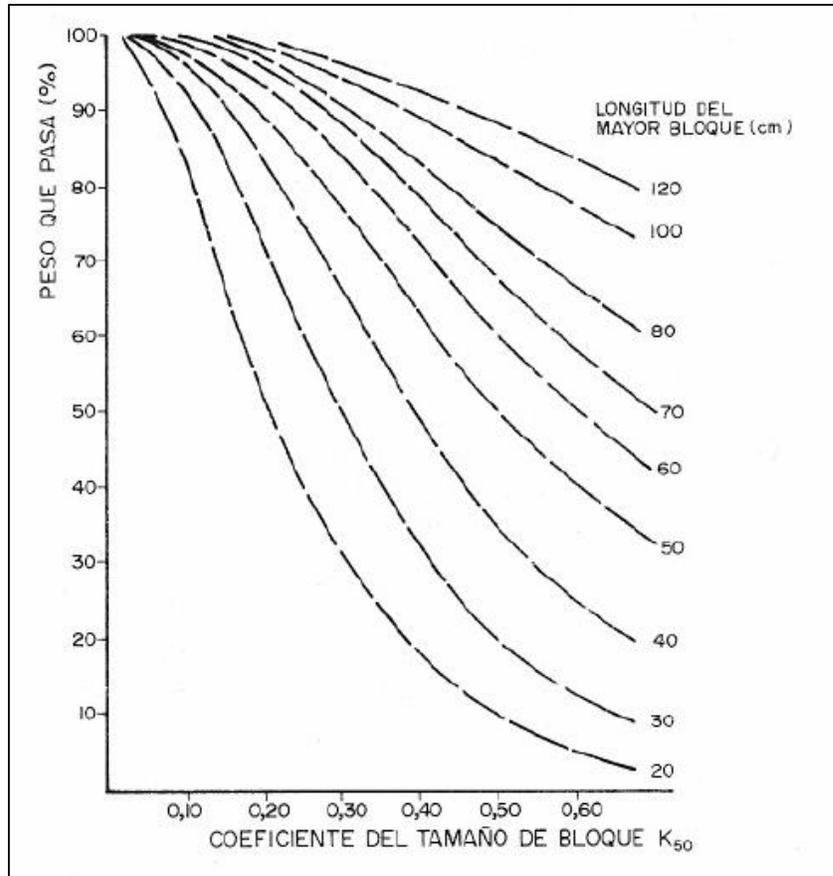


Figura 47. Curvas granulométricas teóricas del material volado para diferentes valores de K_{50} . (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

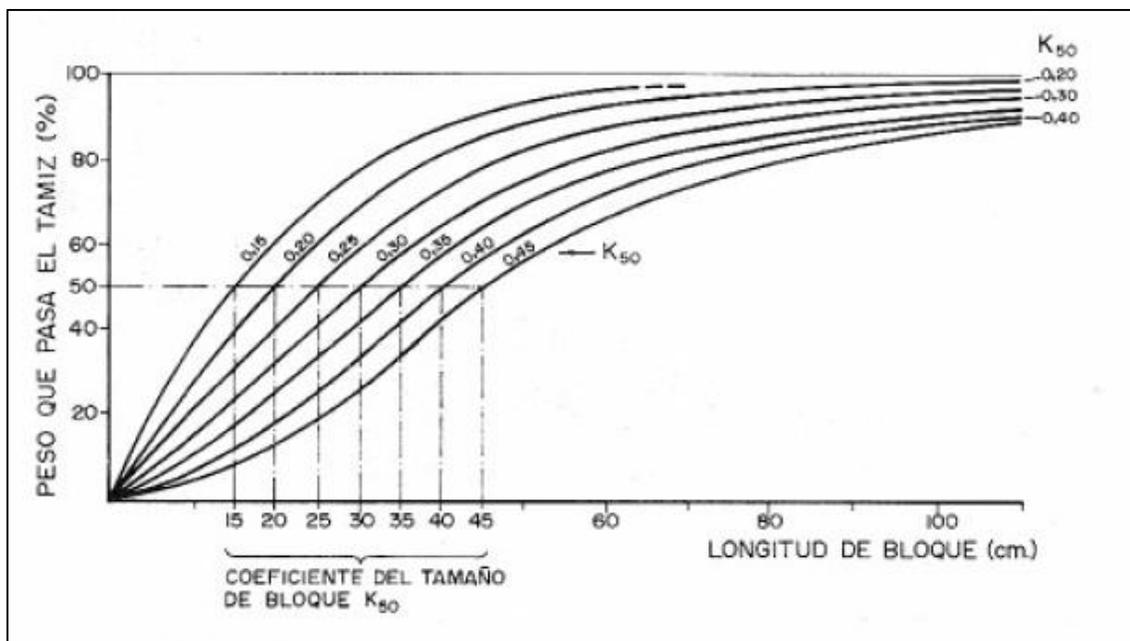


Figura 48. Determinación del Coeficiente del Tamaño de Bloque K_{50} del material fragmentado. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

2.4.2 Fórmula de SVEDEFO (Swedish Detonic Research Foundation)

La fórmula original de Larsson no tiene en cuenta el efecto de la altura de banco y la longitud de retacado, pero la SVEDEFO ha añadido un término de tal manera que la ecuación final es la siguiente (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003):

$$K50 = S * \left[1 + 4,67 * \left(\frac{T}{L} \right)^{2,5} \right] * e^{0,29 * \ln B^2 * \sqrt{\frac{S}{1,25}} - 1,18 * \ln \left[\frac{CE}{c} \right]^{-0,82}}$$

Ecuación 5. Fórmula de SVEDEFO

Las variables nuevas son:

T = Longitud de retacado [m].

L = Profundidad del pozo [m].

2.4.3 Modelo KUZ-RAM

Este modelo ha sido desarrollado por Claude Cunningham (1983), de la AECI de Sudáfrica, a partir de la curva de distribución granulométrica de Rosín-Rammler y la fórmula empírica del tamaño medio de los fragmentos procedentes de tronaduras dada por V. M. Kuznetsov. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

El desarrollo del modelo es el siguiente:

a) Fórmula de Kuznetsov:

$$Tb = Fr * \left(\frac{VR_0}{Q} \right)^{0,8} * Q^{\frac{1}{6}}$$

Ecuación 6. Fórmula de Kuznetsov.

donde:

T_b = Tamaño medio de los fragmentos de tronaduras [cm].

F_r = Factor de roca.

Rocas muy blandas; $F_r = 3$ (f = 3 a 5)

Rocas blandas; $F_r = 5$ (f = 5 a 8)

Rocas medias; $F_r = 7$ (f = 8 a 10)

Rocas duras, fisuradas; $F_r = 10$ (f = 10 a 14)

Rocas duras, homogéneas; $F_r = 13$ (f = 12 a 16)

(f = Factor de Protodyakonov).

VR_o = Volumen de roca fragmentada por pozo [m^3].

Q = Cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por pozo [kg].

Q_b = Carga de explosivo dentro del pozo [kg].

PRP = Potencia Relativa en Peso de este explosivo. (ANFO = 100, TNT = 115)

$$Q_b * PRP = Q * 115$$

$$Q = \frac{Q_b * PRP}{115}$$

La fórmula de Kuznetsov se convierte en:

$$T_b = F_r * \left[\frac{VR_o}{Q_b} \right]^{0,8} * Q_b^{\frac{1}{6}} * \left[\frac{PRP}{115} \right]^{\frac{-19}{30}}$$

ó bien,

$$T_b = F_r * [CE]^{-0,8} * Q_b^{\frac{1}{6}} * \left[\frac{115}{PRP} \right]^{\frac{19}{30}}$$

Ecuación 7. Fórmula de Kuznetsov Modificada.

Siendo:

CE = Consumo específico de explosivo [kg/m^3].

a) **Ecuación de Rosín-Rammler:**

$$PC = e^{-\left(\frac{T_b}{T_{bc}}\right)^u}$$

Ecuación 8. Ecuación de Rosín-Rammler.

donde:

PC = Proporción de material retenido para una abertura de malla « T_b ».

T_b = Abertura de malla.

T_{bc} = Tamaño característico.

u = Índice de uniformidad.

Como la fórmula de Kuznetsov da el valor medio de « T_b » entonces $PC = 0,5$, por lo que:

$$0,5 = e^{-\left(\frac{T_b}{T_{bc}}\right)^u}$$

de donde:

$$T_{bc} = \frac{T_b}{(0,693)^{1/u}}$$

Ecuación 9. Ecuación de Rosin-Rammler modificada.

La ecuación final del modelo KUZ-RAM es una expresión para el índice de uniformidad:

$$n = \left(2,2 - 0,014 * \frac{B}{\Phi_h}\right) * \sqrt{1 - \frac{SD}{B}} * \left[0,5 * \left(1 + \frac{S}{B}\right)\right] * \left[\frac{|L_b - L_c|}{L_{tot}} + 0,1\right]^{0,1} * \left(\frac{L_{tot}}{H}\right)$$

Ecuación 10. Modelo KUZ-RAM

donde:

B = Burden [m].

S = Espaciamiento [m].

Φ_h = Diámetro del pozo perforado [m].

L_b = Largo de la carga de fondo [m].

L_c = Largo de la columna cargada [m].

L_{tot} = Largo de carga total [m].

H = Altura de banco o profundidad del pozo [m].

SD = Desviación estándar de la precisión de perforación [m].

Si las tronaduras se diseñan con un esquema al Tresbolillo el valor de «u» calculado debe incrementarse en un 10%.

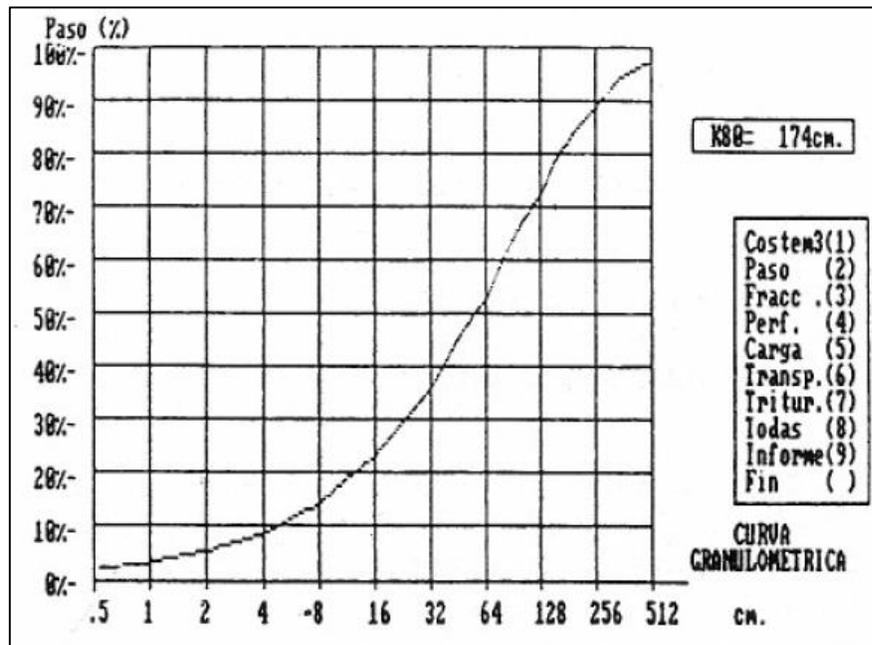


Figura 49. Predicción de la granulometría y determinación del K80 de la roca volada, mediante el programa KUZ-RAM. (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003)

El modelo KUZ-RAM posee ciertas limitaciones para las cuales hay que tener precauciones, a continuación se mencionan algunas (Manual de perforación y voladura de rocas [6], 2003):

- La relación S/B está aplicada al esquema de perforación y no a la secuencia de encendido. No debe exceder de 2.
- Predicción para tronadura a rajo.
- Para subterránea solo aplica si es mediante banqueo.
- No toma en cuenta el secuenciamiento.
- La secuencia de encendido y los tiempos de retardo deben ser tales que proporcionen una buena fragmentación, sin producir cortes o fallos.
- El explosivo debe desarrollar una energía próxima a la potencia relativa en peso calculada.

- La fracturación y homogeneidad del macizo requiere un estudio cuidadoso, especialmente, cuando el espaciamiento entre discontinuidades es más pequeño que la distancia entre pozos.

2.4.4 Modelos JK

Estos modelos son más elaborados y toman en cuenta simulaciones considerando el factor de discontinuidades y el factor de carga.

A continuación se dan a conocer gráficas del modelo:

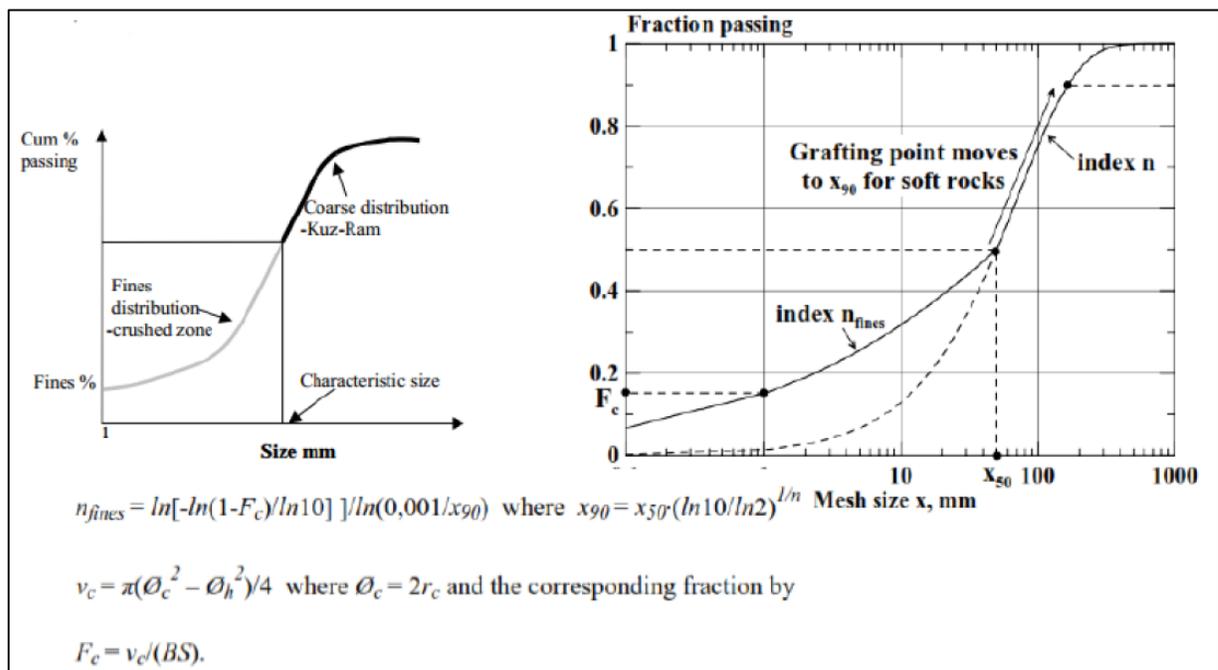


Figura 50. Modelos JK

Capítulo 3: Materiales y métodos

Para este trabajo de memoria se utiliza un enfoque netamente empírico y totalmente aplicado, debido a que los resultados conseguidos y resultados predichos son calculados y obtenidos a partir de fórmulas empíricas, sin embargo, se utiliza un marco teórico lo suficientemente fuerte como para determinar qué factores son relevantes al problema para luego ser evaluados. Además se utiliza investigación descriptiva, pues se requiere de una muestra para las variables de interés para luego establecer conductas a partir de estos datos. Además se tiene que el conocimiento de los explosivos, accesorios y demás implementos a utilizar para la investigación poseen datos técnicos duros respaldados por la empresa Orica Mining Services.

Por lo tanto, el procedimiento resultante es el siguiente:

- 1) **Definición y contextualización del tema de memoria a realizar:** Se comienza con una recopilación de antecedentes e información:

Para esto se ingresa a la base de datos de la minera El Abra, de manera de poder abarcar la mayor cantidad de datos relevantes para la investigación, tanto teórica como empírica y poder dar aplicación a esta en etapas posteriores, con el objetivo de poseer una base sólida para la memoria.

Primero se recolecta información técnica de los explosivos a utilizar y utilizados, calidad del terreno en la mina, características generales de la mina, diseños de tronadura utilizados, fragmentación obtenida hasta el momento, etc.

También se busca información bibliográfica y posibles antecedentes que den cuenta del uso de explosivos de alta energía en otras faenas.

- 2) **Definición de la estructura de trabajo:** La herramienta WBS (Work Breakdown Structure) se genera para obtener principalmente los alcances del trabajo de memoria visualizados en forma simple y esquemática. Se define aquí el tipo de explosivos a utilizar, diseño de la tronadura a implementar, sector de donde se realizará la tronadura, el tiempo de toma de datos y en general hasta donde queda acotada la evaluación de desempeño en post de la entrega de resultados al final del periodo de memoria. (P., 2010)
- 3) **Levantamiento de datos de terreno:** Luego de estipular el tiempo en el punto 2) se procede a la toma de datos en terreno, la cual consiste principalmente en visitar constantemente el sector de tronadura donde será evaluado la aplicación del nuevo

explosivo durante la jornada de trabajo y medir en forma empírica los datos relevantes para la evaluación de desempeño, es decir, el rendimiento del explosivo de alta energía y los insumos utilizados para la obtención de costos operacionales, en conjunto al modo de operar, de manera de almacenar la mayor cantidad de información.

- 4) **Análisis y comparación de resultados:** Se compilan y ordenan los datos para calcular los parámetros de interés de la evaluación de desempeño. De esta manera, se comparan los rendimientos de los explosivos regularmente utilizados y el nuevo de alta energía a utilizar, con el objetivo de visualizar desviaciones y cambios, logrando resultados a través de un cuadro comparativo de manera de observar la eficiencia en fragmentación, costos de operación, costos de producción y rendimientos en el chancador. Todo lo anterior en post de mostrar los resultados en forma clara y simplificada en los entregables de la memoria. Además, con los resultados obtenidos y comparaciones realizadas se procede a calificar cuales son las causas puntuales generadoras de posibles aumentos o disminuciones de los costos y con ello otorgar medidas de control adecuadas en cada caso de manera de generar mayor eficiencia al proceso de perforación y tronadura.

- 5) **Discusión y Conclusiones:** Se discute y emiten conclusiones acerca del trabajo realizado. En suma, capturando el análisis de la parte 4) se procede a realizar las reflexiones necesarias para observar si se cumplieron los objetivos impuestos en un comienzo y reparos en cuanto al trabajo realizado durante todo el periodo de la memoria.

Por lo tanto, primero se realizará un análisis técnico-económico y de fragmentación para 5 propuestas simuladas mediante el software Split Desktop y Split Online y también se harán los mismos análisis para 3 tronaduras de prueba realizadas en terreno llamadas “*Demoblast*”, siendo este el análisis en específico, donde para ambos casos se realizará una comparación con un caso base, donde no se utiliza el nuevo explosivo de alta energía. Este caso base, para las “*Demoblast*” posee las mismas dimensiones de malla, forma de carguío y explosivo que 38 tronaduras realizadas, de manera de no perder representatividad en los resultados obtenidos.

También se realizará un análisis histórico, donde se verán los costos de tronadura asociados a los meses Enero, Febrero y Marzo del 2015, meses en los cuales todavía no eran utilizados los nuevos explosivos de alta energía y luego para los meses Julio, Agosto y Septiembre de 2015, donde si fue aplicado la nueva iniciativa de cambio de explosivo.



Figura 51. Caso base para Demoblast y 1° Demoblast en terreno.

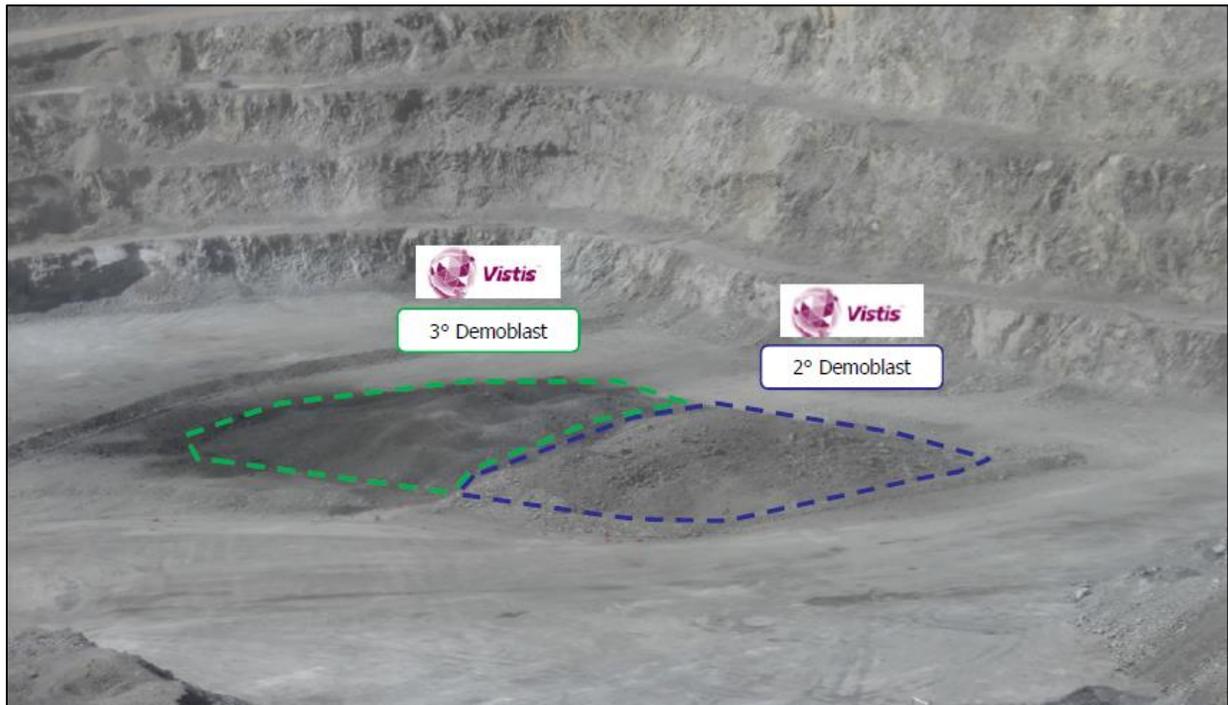


Figura 52. 2° Demoblast y 3° Demoblast en terreno.

Dentro del análisis final de las pruebas en terreno, se considerará los efectos de la fragmentación en el rendimiento del chancador con el objetivo de ver los costos energéticos asociados al analizar potencia; aumento o disminución del tonelaje ingresado al chancador con respecto al cambio de explosivo de manera de observar los beneficios o pérdidas al ingresar más o menos cobre; y pérdidas por “*cargas redireccionadas por fragmentación gruesa*”, con esto se hace referencia a cuando el material correspondiente a cierta tronadura es cargado pero debido a mala fragmentación (presencia de material de gran diámetro de partícula) no es enviado al destino correspondiente, por ejemplo, una tronadura es netamente mineral y se debe enviar al chancador, sin embargo, por poseer material demasiado grueso es enviado a ROM generando pérdidas considerables en cuanto a recuperación.

Para el caso del análisis del rendimiento del chancador y cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, se realizará un análisis histórico, donde para el primer escenario se observará potencia y tonelaje para los meses Enero, Febrero y Marzo del 2015, meses en los cuales todavía no eran utilizados los nuevos explosivos de alta energía y luego para los meses Julio, Agosto y Septiembre de 2015, donde si fue aplicado la nueva iniciativa de cambio de explosivo, con el fin de observar cambios en potencia y tonelaje del chancador; y para el caso de las cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, observar el cambio de tonelaje distribuido en la mina, conjunto a esto también se realizará un análisis específico para ciertas “*Demoblast*” en comparación al caso base, de manera de observar cambios directos en el rendimiento del chancador y las cargas redireccionadas por fragmentación gruesa para estos casos.

Finalmente, se confeccionará un flujo de caja para el análisis histórico de manera de observar la rentabilidad de la alternativa de cambio de explosivo, además de un flujo de caja para el análisis específico de las “*Demoblasts*”. Estos flujos de caja considerarán:

- Aumento o disminución de tonelaje en chancador.
- Pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa.
- Costos energéticos asociados al chancador de acuerdo a la potencia utilizada.
- Costo de perforación y tronadura.

3.1 Determinación de costos energéticos de chancador

Se obtiene a partir de una base de datos de la minera El Abra la potencia en kilowatts hora del chancador, ya sea para el caso del análisis histórico donde se obtiene el promedio para los meses mencionados o para el análisis específico, considerándose un costo de 0,115 [USD/kW], por lo tanto, el costo energético se obtiene de la siguiente manera:

- Caso análisis histórico:

Costo energético de Ch. [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Potencia } ch_i \left[\frac{kW}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * \text{días}_i \left[\frac{día}{mes} \right] * \text{Costo energía} \left[\frac{USD}{kW} \right] \\ * \text{Eficiencia del } ch_i$$

Ecuación 11. Costo energético de chancador histórico.

Con las siguientes eficiencias del chancador para los distintos meses obtenidas a partir de la base de minera El Abra:

Tabla 12. Eficiencia chancador por mes caso histórico para costo energético.

	Enero	Febrero	Marzo	Julio	Agosto	Septiembre
Días del mes	31	28	31	31	31	16
Horas del día	24	24	24	24	24	24
Eficiencia	0,75	0,80	0,71	0,80	0,73	0,76
Utilización	0,87	0,89	0,84	0,88	0,81	0,80
Disponibilidad	0,86	0,89	0,84	0,90	0,90	0,95

Donde se calcula para los 3 meses involucrados e i corresponde al mes del cuartil que se está analizando y días corresponde a los días del mes i. (Para el caso del mes de Septiembre se utiliza un factor de escalamiento de 2, para escalar a un mes de funcionamiento normal).

- Caso análisis específico:

Costo energético de Ch. [USD]

$$= \text{Potencia } Ch. \left[\frac{kW}{h} \right] * 24 \left[\frac{hr.}{día} \right] * 1 \left[\text{día} \right] * \text{Costo energía} \left[\frac{USD}{kW} \right] \\ * \text{Eficiencia del } ch.$$

Ecuación 12. Costo energético de chancador específico.

Con las siguientes eficiencias del chancador para los distintos días respectivos a la extracción de cada tronadura obtenidas a partir de la base de minera El Abra:

Tabla 13. Eficiencia chancador por día caso específico para costo energético.

	Primer caso	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Horas del día	24	24	24	24	24
Día de extracción	09/10-10-15	18-06-15	07-07-15	16-08-15	17-08-15
Eficiencia	0,94	0,90	0,90	0,91	0,96
Utilización	0,96	0,91	0,90	0,91	0,96
Disponibilidad	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00

Donde se calcula para el día de funcionamiento del chancador y la potencia y eficiencia promedio de ese día en particular en que fue extraída la tronadura.

Para ambos casos, se filtra la información, de manera de eliminar potencias negativas de la base de datos, ya que corresponde a información errónea y que altera el análisis.

3.2 Determinación de beneficio de tonelaje pasante chancador

Para la obtención del beneficio gracias al tonelaje que se alcanza en el chancador, se comienza por la adquisición de los tonelajes por hora que recibe el chancador a partir de la base de datos de minera El Abra. Luego, teniendo en cuenta las siguientes leyes promedio por mes en el año 2015:

Tabla 14. Leyes promedio por mes periodo 2015.

Mes	Ley [%]
Enero	0,279
Febrero	0,284
Marzo	0,307
Promedio 1er Cuartil	0,290
Abril	0,274
Junio	0,301
Julio	0,336
Promedio 2do Cuartil	0,304
Julio	0,306
Agosto	0,337
Septiembre	0,332
Promedio 3er Cuartil	0,325
Octubre	0,324
Promedio Total	0,308

Además, se considera un precio para el cobre de 2,3355 [USD/lb]¹⁷, por lo que con esto, el beneficio a partir del tonelaje pasante en el chancador se calcula como:

- Caso análisis histórico:

Beneficio Tonelaje pasante Ch. [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Toneladas Ch.}_i \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] * 24 \left[\frac{\text{hr.}}{\text{día}} \right] * \text{días}_i \left[\frac{\text{día}}{\text{mes}} \right] * \text{Eficiencia}_i * \text{Ley promedio} \\ * \text{Precio Cobre} \left[\frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right]$$

Ecuación 13. Beneficio tonelaje pasante chancador análisis histórico.

Con las siguientes eficiencias del chancador para los distintos meses obtenidas a partir de la base de minera El Abra:

Tabla 15. Eficiencia chancador por mes caso histórico para beneficio tonelaje pasante.

	Enero	Febrero	Marzo	Julio	Agosto	Septiembre
Días del mes	31	28	31	31	31	16
Horas del día	24	24	24	24	24	24
Eficiencia	0,75	0,80	0,71	0,80	0,73	0,76
Utilización	0,87	0,89	0,84	0,88	0,81	0,80
Disponibilidad	0,86	0,89	0,84	0,90	0,90	0,95

Donde la ley promedio corresponde a la ley promedio entre los dos cuartiles que se está analizando, esto debido a que a modo de comparación, en el tercer cuartil las leyes son más altas que en el primero por lo que tienen que estar a la misma escala. Además se calcula para los 3 meses involucrados e *i* corresponde al mes del cuartil que se está analizando y días corresponde a los días del mes *i*, se tiene para las toneladas chancador que serán las respectivas a cada mes. (Para el caso del mes de Septiembre se utiliza un factor de escalamiento de 2, para escalar a un mes de funcionamiento normal).

- Caso análisis específico:

Beneficio Tonelaje pasante Ch. [USD]

$$= \text{Toneladas Ch.} \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] * 24 \left[\frac{\text{hr.}}{\text{día}} \right] * 1 [\text{día}] * \text{Ley promedio} * \text{Eficiencia del ch.} \\ * \text{Precio Cobre} \left[\frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right]$$

Ecuación 14. Beneficio tonelaje pasante chancador análisis específico.

¹⁷ Precio a la fecha 03/11/15.

Con las siguientes eficiencias del chancador para los distintos días respectivos a la extracción de cada tronadura obtenidas a partir de la base de minera El Abra:

Tabla 16. Eficiencia chancador por día caso específico para beneficio tonelaje pasante.

	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Horas del día	24	24	24	24
Día de extracción	18-06-15	07-07-15	16-08-15	17-08-15
Eficiencia	0,90	0,90	0,91	0,96
Utilización	0,91	0,90	0,91	0,96
Disponibilidad	0,99	1,00	1,00	1,00

Donde la ley promedio corresponde a la ley promedio de los meses involucrados para así generar igualdad en cuanto a la comparación y las toneladas chancador corresponden a las toneladas por hora promedio de ese día en particular en que fue extraída la tronadura.

Para ambos casos, se filtra la información, de manera de eliminar tonelajes negativos de la base de datos, ya que corresponde a información errónea y que altera el análisis.

3.3 Determinación de pérdidas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa

Para la obtención de las pérdidas generadas por cargas redireccionadas por fragmentación gruesa, se comienza por la adquisición de los tonelajes de cargas redireccionadas (CRD) obtenidas en los distintos meses del 2015 a partir de la base de datos de minera El Abra, en conjunto a las leyes promedio del periodo 2015 mencionadas con anterioridad y considerando 2,3355 [USD/lb]⁵ como precio del cobre y 0,07% la recuperación en el ROM, se tiene que las pérdidas se calculan como:

- Caso análisis histórico:

Pérdidas por CRD [USD]

$$= \sum_{i=1}^3 \text{Toneladas CRD [ton]}_i * \text{Ley promedio} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right]$$

Ecuación 15. Pérdidas por cargas redireccionadas análisis histórico.

Donde la ley promedio corresponde a la ley promedio entre los dos cuartiles que se está analizando menos la recuperación de ROM y las toneladas CRD i son las toneladas totales

de cargas redireccionadas del mes del cuartil, por lo tanto, *i* es el contador del mes del cuartil. (Para el caso del mes de Septiembre se utiliza un factor de escalamiento de 2, para escalar a un mes de funcionamiento normal).

- Caso análisis específico:

Pérdidas por CRD [USD]

$$= \text{Toneladas CRD [ton]} * \text{Ley promedio} * \text{Precio Cobre} \left[\frac{\text{USD}}{\text{lb}} \right] * \frac{1}{0,000453592} \left[\frac{\text{lb}}{\text{ton}} \right]$$

Ecuación 16. Pérdidas por cargas redireccionadas análisis específico.

Donde la ley promedio corresponde a la ley promedio entre las “*Demoblasts*” que se está analizando menos la recuperación del ROM y las toneladas CRD son las toneladas de cargas redireccionadas del día en que fue extraída la tronadura.

3.4 Determinación del P80

Para la determinación de la granulometría observada en una tronadura (para evaluar si la tronadura fue exitosa en términos de fragmentación), se emplea el término P80, que se define como el 80% de material pasante de una muestra.

Para determinar el P80 se emplea el software de análisis de fragmentación *Split Desktop* y *Split Online*.

El procedimiento utilizado para la obtención del P80 con los softwares mencionados es el siguiente¹⁸:

- Capturar la imagen en el frente de carguío (alrededor de 5 fotos por punto).
- Analizar el set de imágenes capturadas, con una escala definida, la cual para el caso de SCM El Abra se usa un escalímetro de 50 centímetros.
- Obtener la curva granulométrica para evaluar el P80.

¹⁸ A pesar de que se toman 5 fotos por punto de la “M”, la representatividad de la fragmentación obtenida está respaldada por fotografías tomadas por las palas de extracción. Estas toman alrededor de 1000 fotografías en la frente de carguío, las cuales son analizadas y filtradas mediante el software Split Online a nivel de compañía, para luego reenviar un informe con la fragmentación respectiva, corroborando los valores de la granulometría obtenida en los resultados.

La captura de imágenes en el frente de carguío se debe realizar en forma de una letra “M” para abarcar en lo posible todas las zonas de la frente. Para entender mejor esta práctica se presenta la siguiente figura, donde en cada punto verde se alrededor de 5 fotos:



Figura 53. Sugerida toma de imágenes en la frente de carguío.

Las imágenes capturadas deben estar en lo posible, en forma perpendicular con el escalímetro, para que el software pueda asignar de forma correcta el tamaño de los fragmentos de roca.



Figura 54. Sugerida toma de imágenes.

Finalmente las fotografías son evaluadas en *Split Online* y *Split Desktop*, donde primero se realiza un filtro a la imagen donde se deja en blanco y negro o en un espectro de 2 colores, con el fin de distinguir el material particulado, además se agrega la distancia del escalímetro o instrumento de referencia utilizado en la fotografía, de manera de dar escala a la imagen y el software logre reconocerla.

Como funciona Split Desktop

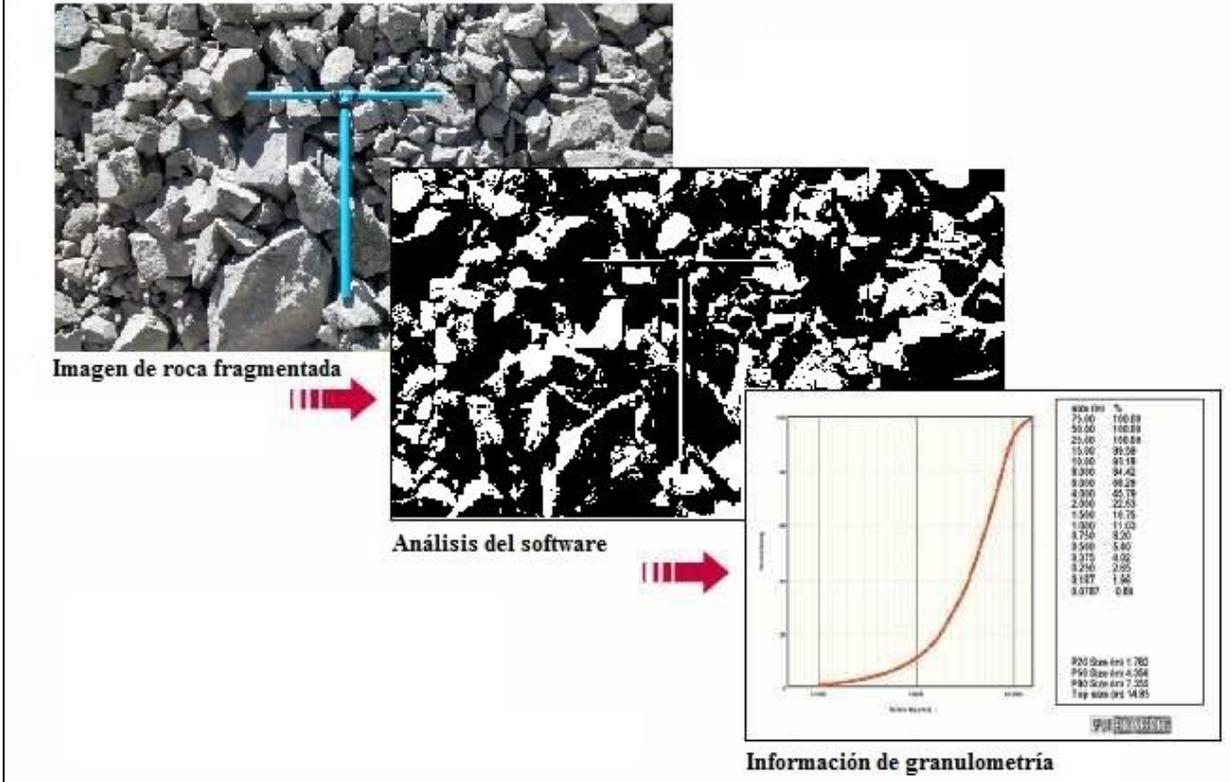


Figura 55. Como funciona Split Desktop.

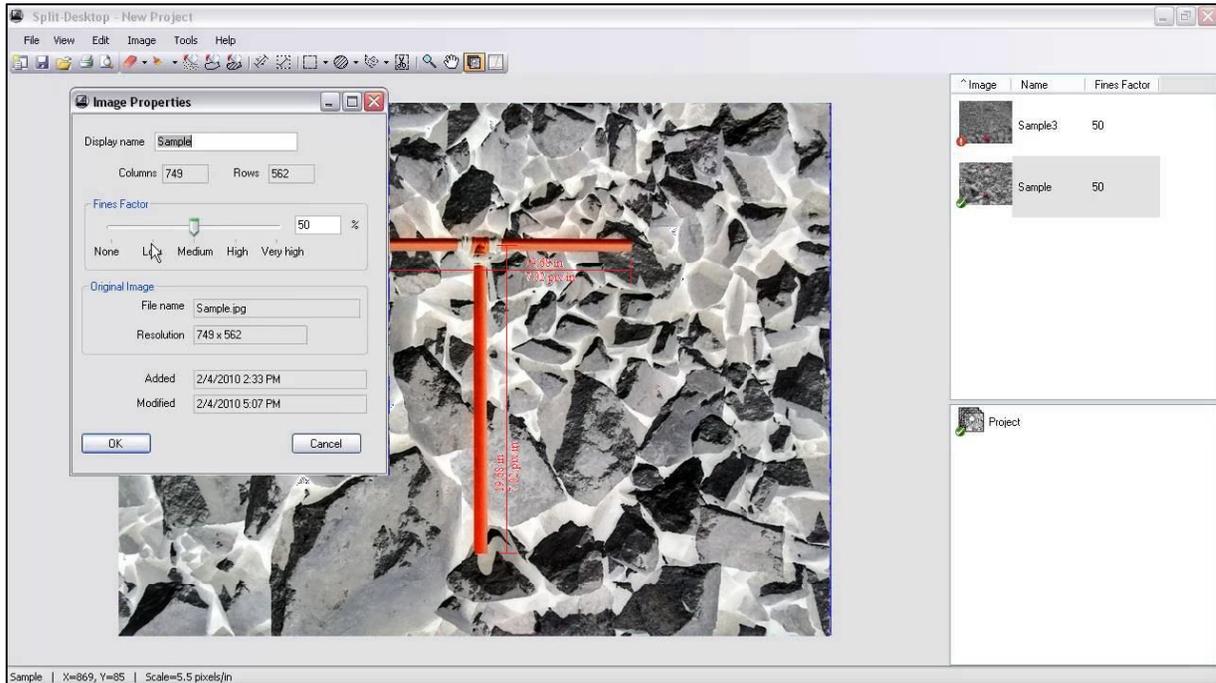


Figura 56. Imagen filtrada en Split Desktop.

Todo esto se realiza con el fin de generar la curva granulométrica asociada a la imagen y determinar el P80 de la tronadura. La curva entregada por el software se ilustra en la siguiente figura:

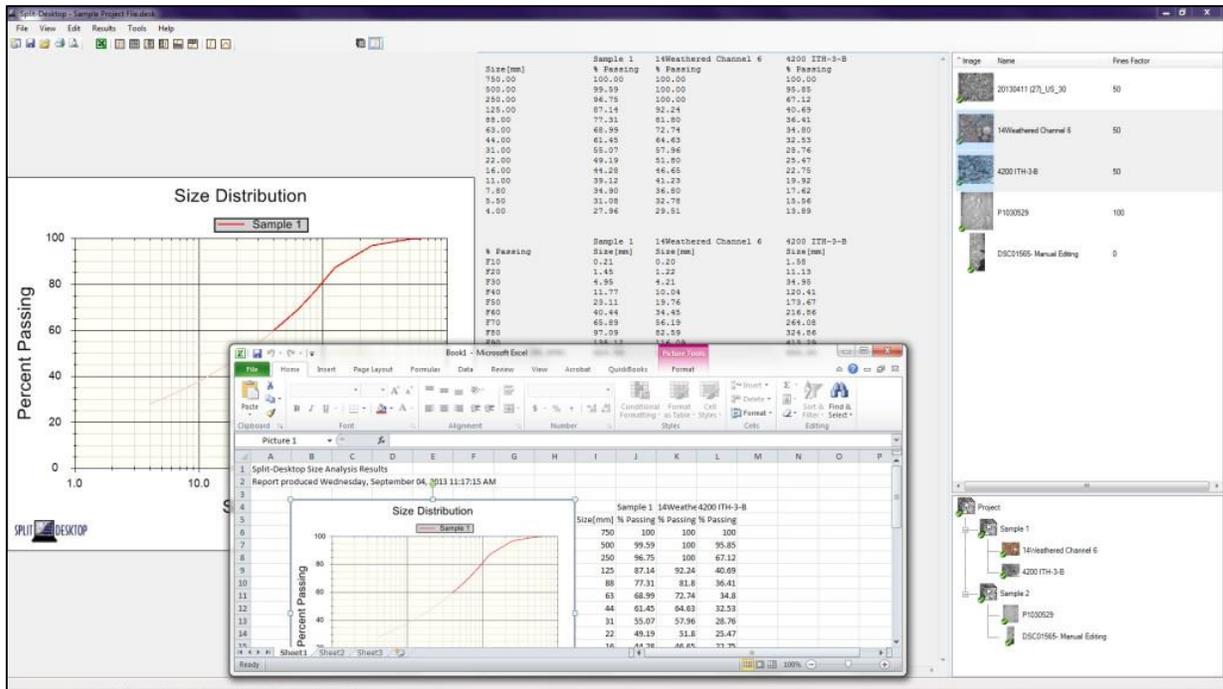


Figura 57. Curva granulométrica obtenida en Split Desktop.

3.5 Análisis técnico-económico asociado a perforación y tronadura

Para realizar el análisis técnico-económico, es de relevancia calcular el factor de carga [g/ton]:

$$\text{Factor de Carga} \left[\frac{g}{ton} \right] = \frac{\text{grs. Explosivo}}{\text{Tonelaje a remover}}$$

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\rho_e * \text{Volumen Columna de Explosivo}}{B * E * \rho_r * H}$$

$$\text{Factor de Carga} = \frac{\rho_e * \left[((H + P) - T) * \frac{\pi}{4} * \phi^2 \right]}{B * E * \rho_r * H}$$

Ecuación 17. Factor de Carga Total.

donde:

ρ_e = Densidad del explosivo [g/cm³].

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

T = Taco [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

ϕ = Diámetro del pozo [cm].

Para el caso del factor de carga total de ANFO equivalente, basta con llevar el factor de carga total a gramos equivalentes de ANFO mediante la potencia en peso relativa.

- Caso análisis histórico:

Se considera un costo de perforación promedio histórico representativo de 12 [USD/m] el cual incluye los costos de acero y costos asociados al equipo de perforación:

$$\text{Costo de perforación} = \frac{PT}{VU} + \frac{CM}{VP}$$

Ecuación 18. Costo de perforación por metro.

donde:

PT = Precio del tricono [USD].

VU = Vida útil del tricono [m].

CM = Costo máquina [USD/h].

VP = Velocidad de penetración [m/h].

Para calcular el costo de perforación por tonelada en [USD/ton] se consideran los metros perforados obtenidos de la base de datos de minera El Abra con respecto al cuartil a analizar y a cuanto tonelaje removido en ese mismo cuartil. (Para el caso del mes de Septiembre se utiliza un factor de escalamiento de 2, para escalar a un mes de funcionamiento normal).

$$\text{Costo de perforación por ton.} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Metros perforados} * \text{Costo de perforación}}{\text{Toneladas por pozo}}$$

$$\text{Costo de perforación por tonelada} = \frac{(H+P) * \text{Costo de perforación}}{B * E * H * \rho_r}$$

Ecuación 19. Costo de perforación por tonelada caso histórico.

donde:

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

Luego, para el precio por tonelada en la tronadura [USD/ton] se obtiene a partir de la base de datos de minera El Abra para el cuartil analizado.

Por último el costo final por tonelada de todo el proceso de perforación y tronadura [USD/ton] se obtiene como la suma del costo de perforación por tonelada y el precio por tonelada en la tronadura.

- Caso análisis específico:

Se considera el mismo costo de perforación promedio histórico representativo de 12 [USD/m] considerado en el análisis histórico, con esto, para calcular el costo de perforación por tonelada en [USD/ton] se consideran los metros perforados (dados del diseño de la malla de tronadura) y a cuanto tonelaje por pozos corresponde.

$$\text{Costo de perforación por ton.} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Metros perforados} * \text{Costo de perforación}}{\text{Toneladas por pozo}}$$

$$\text{Costo de perforación por tonelada} = \frac{(H+P) * \text{Costo de perforación}}{B * E * H * \rho_r}$$

Ecuación 20. Costo de perforación por tonelada caso específico.

donde:

ρ_r = Densidad de la roca [ton/m³].

B = Burden [m].

E = Espaciamiento [m].

P = Pasadura [m].

H = Altura de banco [m].

Luego, para el precio por tonelada en la tronadura [USD/ton], se tiene lo siguiente:

$$\text{Costo explosivo bulk} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{Precio explosivo} * \text{Toneladas de explosivo} + \text{Accesorios} * \text{Precio accesorios}}{\text{Tonelaje a remover}}$$

Ecuación 21. Precio por tonelada (Tronadura).

Por último el costo final por tonelada de todo el proceso de perforación y tronadura [USD/ton] se obtiene como:

$$\text{Costo final por ton. (PyT)} \left[\frac{\text{USD}}{\text{ton}} \right] = \text{Costo de perforación por ton.} + \text{Precio por ton. (Tronadura)}$$

Ecuación 22. Costo final por tonelada (PyT).

Capítulo 4: Resultados y Análisis

Se debe tener especial cuidado con el proceder durante el proceso de tronadura, de manera de observar si se realizaron correctamente los pasos de manera de no generarse datos erróneos, en post de conseguir mejores resultados, más correctos y confiables.

Es de relevancia observar la factibilidad de la aplicación de este nuevo explosivo de alta energía, de ser factible su utilización se considera una aplicación general en la mina en particular en sectores de alta dureza.

4.1 Resultados propuestas simuladas

Se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico para el caso base:

Tabla 17. Parámetros caso base para las propuestas.

	Parámetros	Caso Base
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	6
	Espaciamiento [m]	7
	Relación (E/B)	1,17
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1644
	IP [ton/m]	103
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Fortis Extra 65
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	680
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Fortis Extra 65
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,25
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	435
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	544
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2.057
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,25
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,117
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,502
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,385

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo del caso base se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

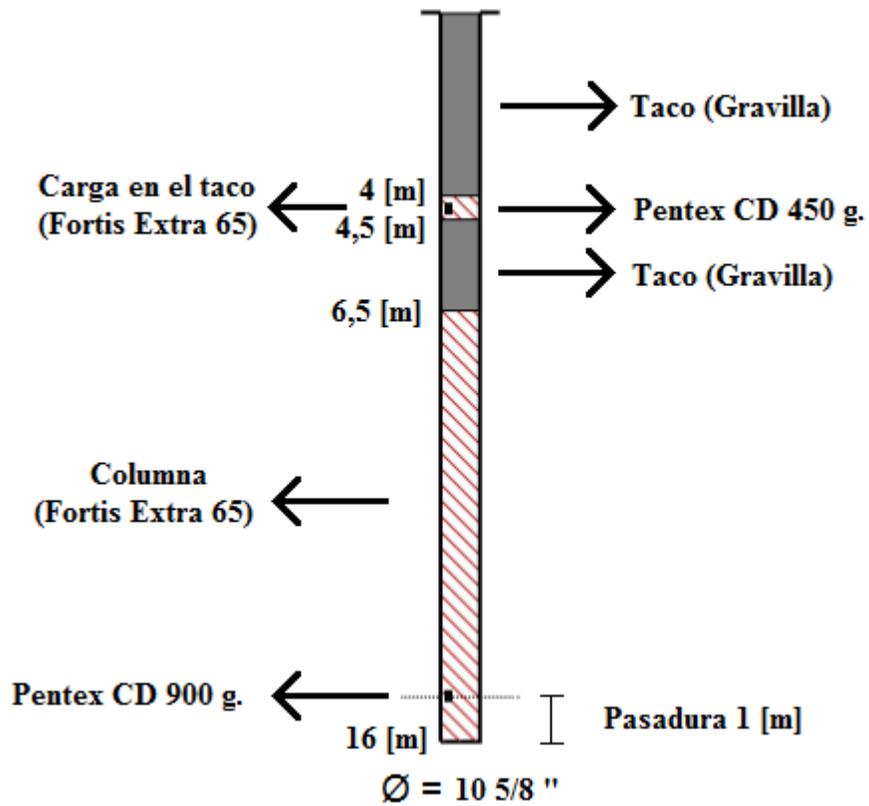


Figura 58. Carguío del pozo caso base para las propuestas.

En cuanto a los resultados de fragmentación para el caso base:

Tabla 18. Porcentaje pasante caso base para las propuestas.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	14
20	38
30	64
40	91
50	120
60	153
70	191
80	240
90	316
100	688

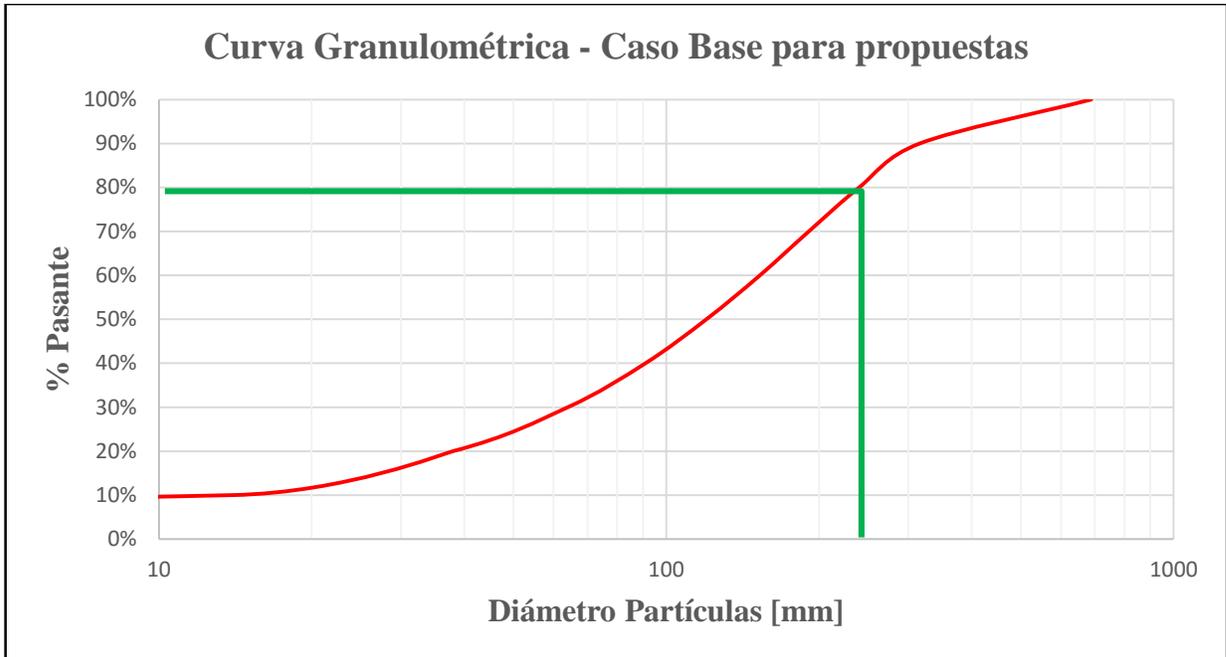


Figura 59. Curva granulométrica caso base para las propuestas.

Luego para la propuesta 1, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico:

Tabla 19. Parámetros propuesta 1.

	Parámetros	Propuesta 1
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	6
	Espaciamiento [m]	7
	Relación (E/B)	1,17
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1644
	IP [ton/m]	103
	Columna	Taco [m]
Explosivo [tipo]		Vistis 225
Densidad Lineal [kg/m]		72
Longitud de Carga [m]		9,5
Carga por Pozo [kg/pozo]		685
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,26
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	438
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	614
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2322
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,41
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,117
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,714
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,598

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la propuesta 1 se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

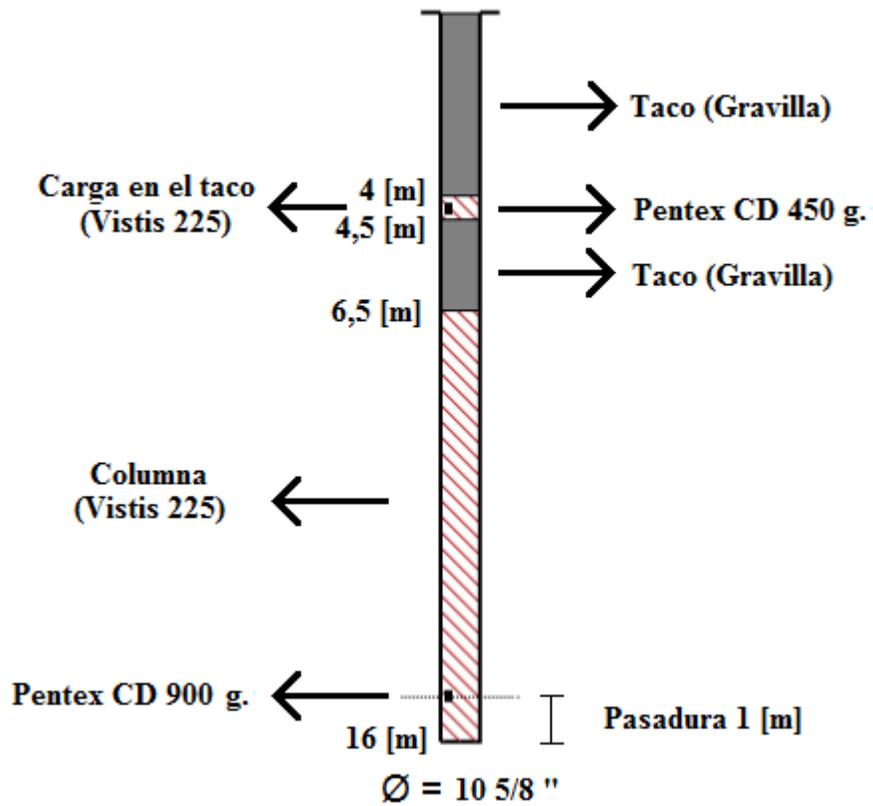


Figura 60. Carguío del pozo propuesta 1.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la propuesta 1:

Tabla 20. Porcentaje pasante propuesta 1.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	8
20	22
30	39
40	58
50	79
60	103
70	133
80	172
90	234
100	581

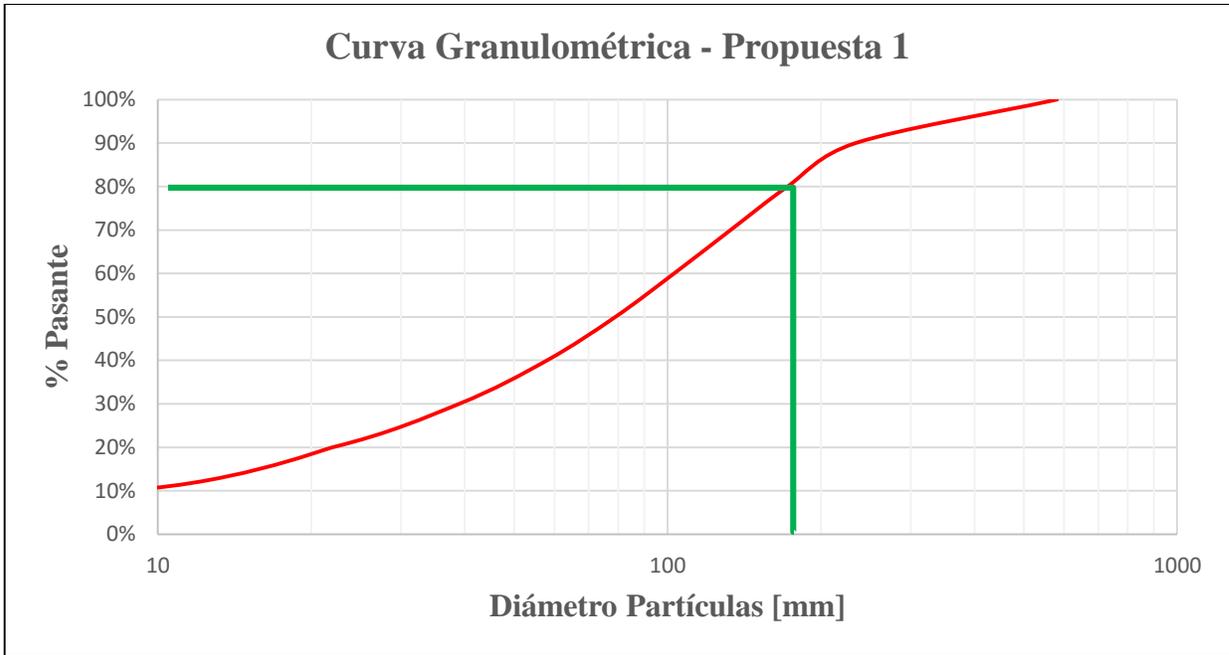


Figura 61. Curva granulométrica propuesta 1.

Luego para la propuesta 2, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico:

Tabla 21. Parámetros propuesta 2.

	Parámetros	Propuesta 2
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	5,5
	Espaciamiento [m]	5,5
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1184
	IP [ton/m]	74
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	10
	Carga por Pozo [kg/pozo]	721
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	609
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	853
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2322
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,96
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,162
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,955
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,792

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la propuesta 2 se tiene lo siguiente, considerando solo una prima donde la carga posee un Pentex CD de 900 [g], además de tener en cuenta el uso de 1 detonador i-kon RX de 20 metros y 1 detonador Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

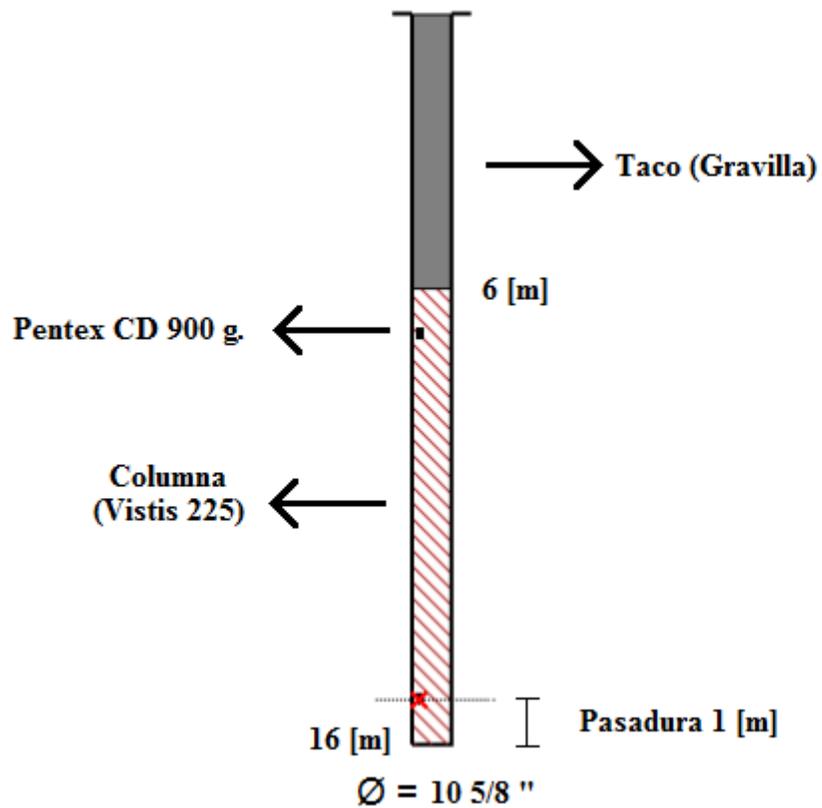


Figura 62. Carguío del pozo propuesta 2.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la propuesta 2:

Tabla 22. Porcentaje pasante propuesta 2.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	6
20	13
30	29
40	49
50	73
60	103
70	139
80	187
90	260
100	557

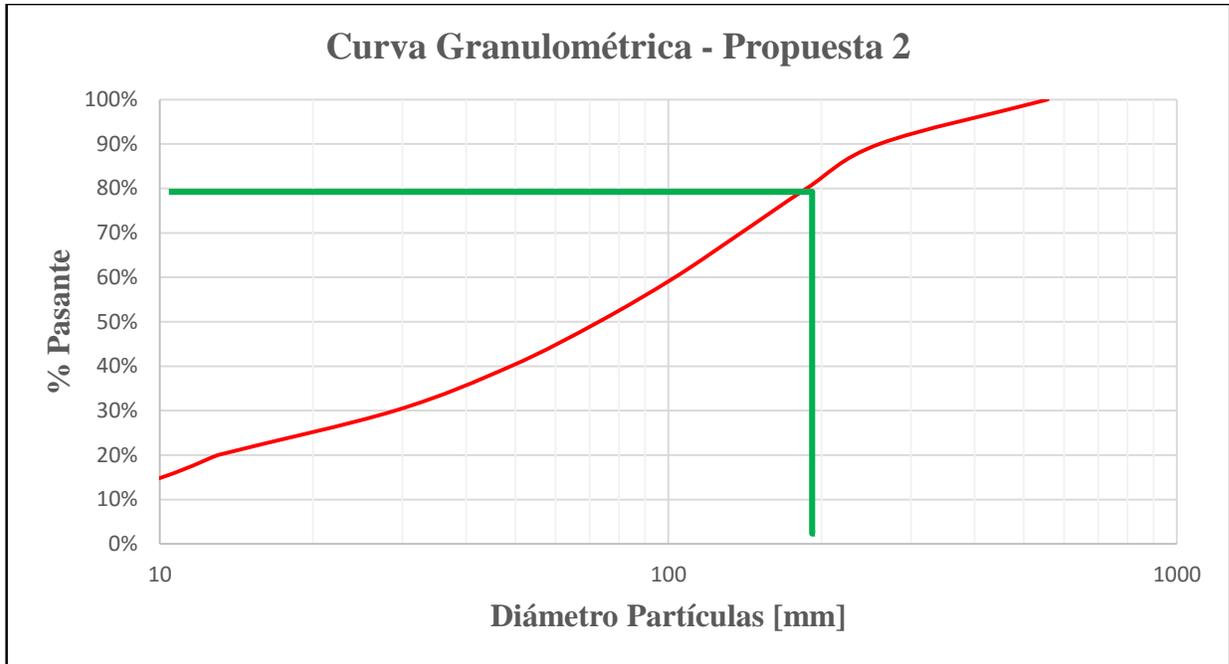


Figura 63. Curva granulométrica propuesta 2.

Luego para la propuesta 3, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico:

Tabla 23. Parámetros propuesta 3.

	Parámetros	Propuesta 3
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	5,5
	Espaciamiento [m]	5,5
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1184
	IP [ton/m]	74
Columna	Taco [m]	6,5
	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	685
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	578
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	810
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2206
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,86
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,162
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,917
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,755

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la propuesta 3 se tiene lo siguiente, considerando solo una prima donde la carga posee un Pentex CD de 900 [g], además de tener en cuenta el uso de 1 detonador i-kon RX de 20 metros y 1 detonador Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

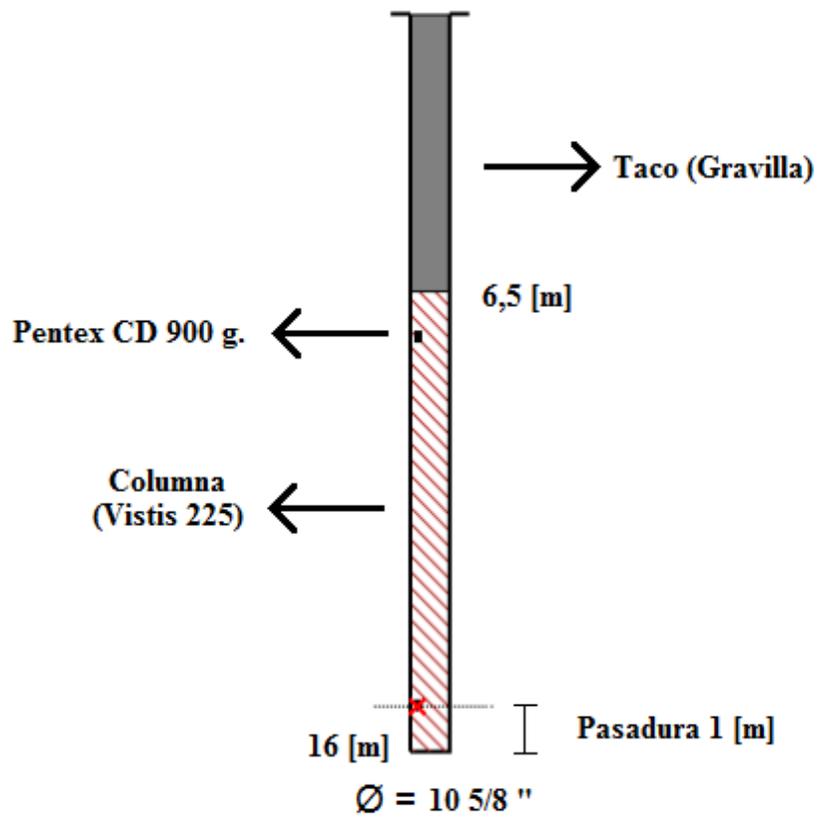


Figura 64. Carguío del pozo propuesta 3.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la propuesta 3:

Tabla 24. Porcentaje pasante propuesta 3.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	5
20	14
30	29
40	50
50	76
60	108
70	147
80	198
90	276
100	558

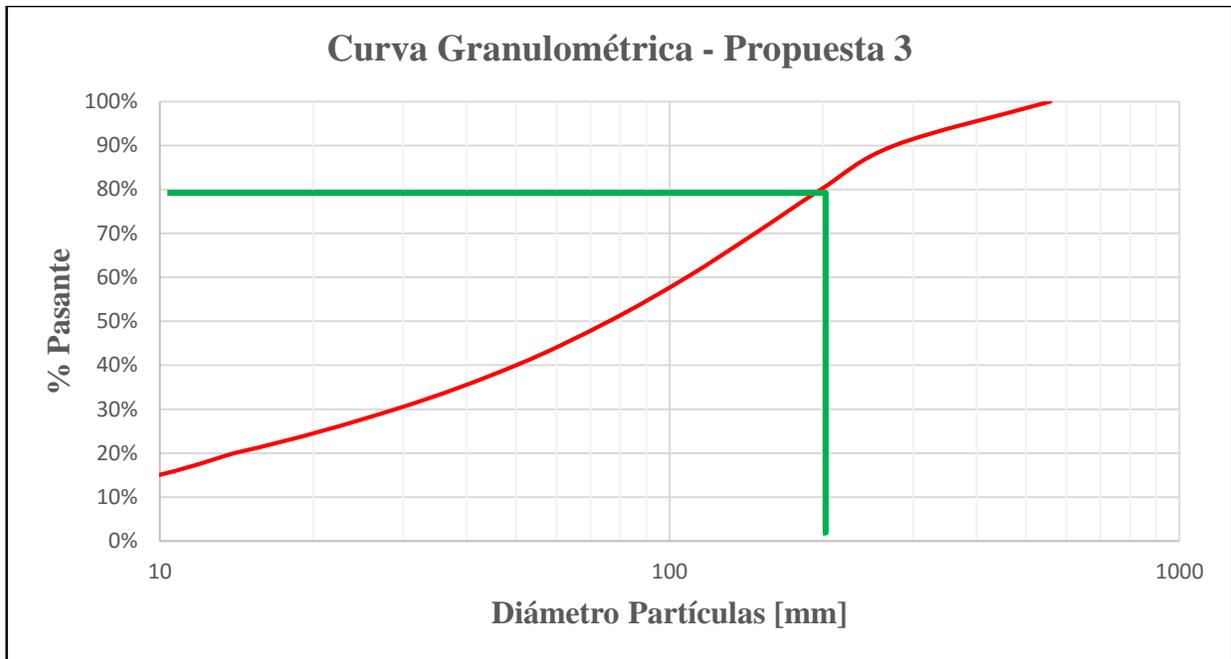


Figura 65. Curva granulométrica propuesta 3.

Luego para la propuesta 4, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico:

Tabla 25. Parámetros propuesta 4.

	Parámetros	Propuesta 4
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	5
	Espaciamiento [m]	5
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	979
	IP [ton/m]	61
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	10
	Carga por Pozo [kg/pozo]	721
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	736
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	1032
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2322
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	2,37
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,196
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	1,155
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,959

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la propuesta 4 se tiene lo siguiente, considerando solo una prima donde la carga posee un Pentex CD de 900 [g], además de tener en cuenta el uso de 1 detonador i-kon RX de 20 metros y 1 detonador Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

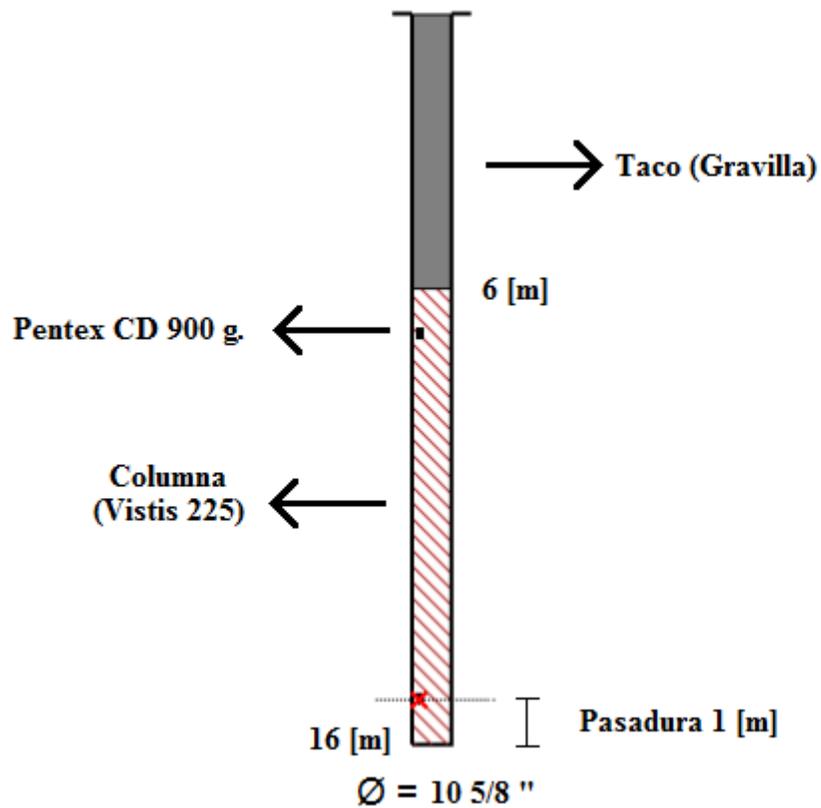


Figura 66. Carguío del pozo propuesta 4.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la propuesta 4:

Tabla 26. Porcentaje pasante propuesta 4.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	5
20	9
30	23
40	40
50	60
60	85
70	117
80	159
90	225
100	492

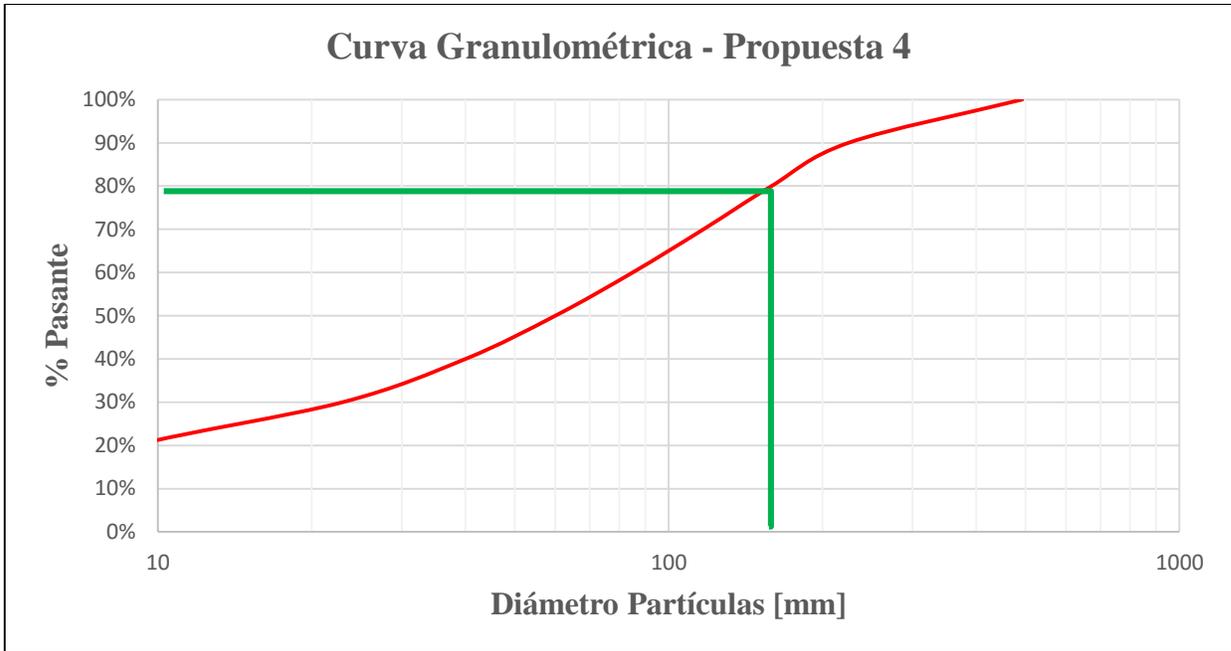


Figura 67. Curva granulométrica propuesta 4.

Luego para la propuesta 5, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico:

Tabla 27. Parámetros propuesta 5.

	Parámetros	Propuesta 5
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	5
	Espaciamiento [m]	5
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	979
	IP [ton/m]	61
Columna	Taco [m]	6,5
	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	685
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	700
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	980
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2206
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	2,25
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,196
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	1,109
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,913

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la propuesta 5 se tiene lo siguiente, considerando solo una prima donde la carga posee un Pentex CD de 900 [g], además de tener en cuenta el uso de 1 detonador i-kon RX de 20 metros y 1 detonador Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

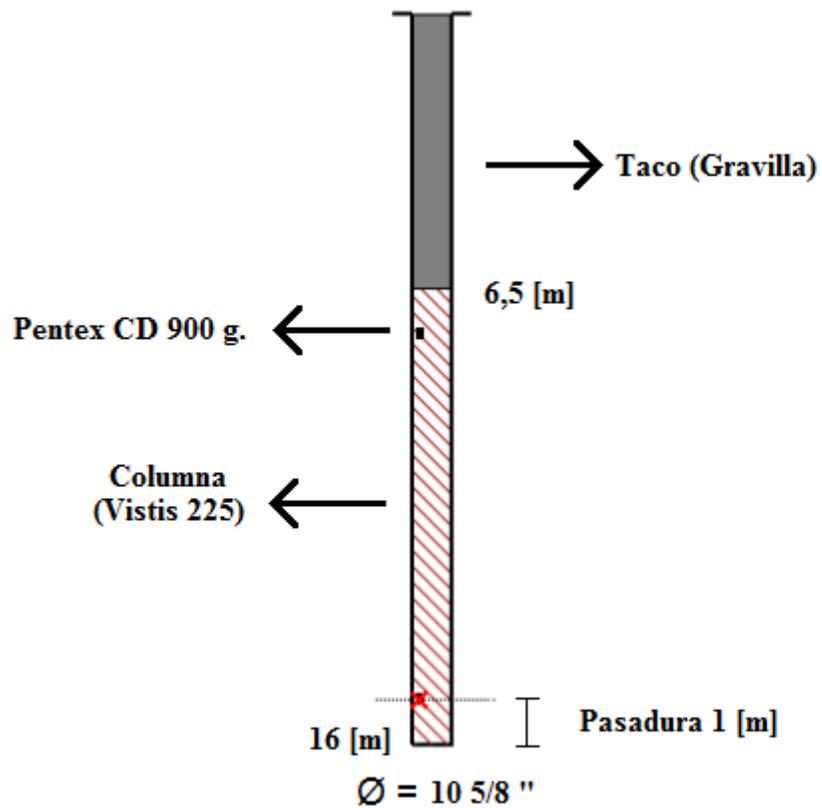


Figura 68. Carguío del pozo propuesta 5.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la propuesta 5:

Tabla 28. Porcentaje pasante propuesta 5.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	5
20	10
30	23
40	41
50	63
60	90
70	124
80	169
90	238
100	522

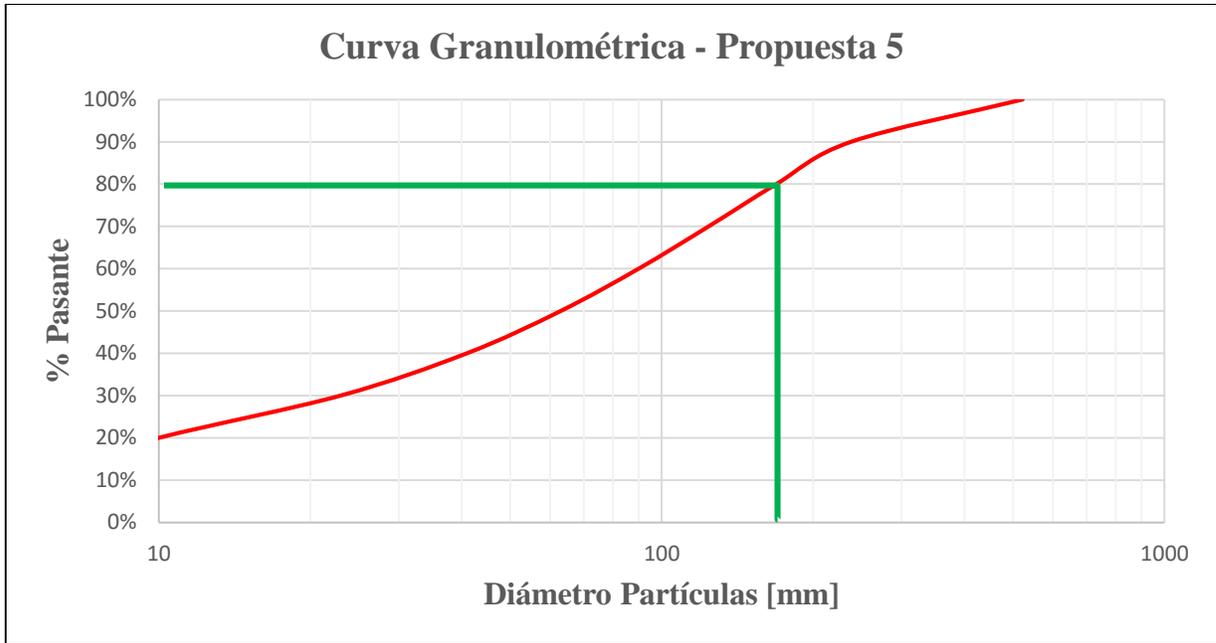


Figura 69. Curva granulométrica propuesta 5.

A modo de comparación, se grafican los casos bases con las distintas propuestas:

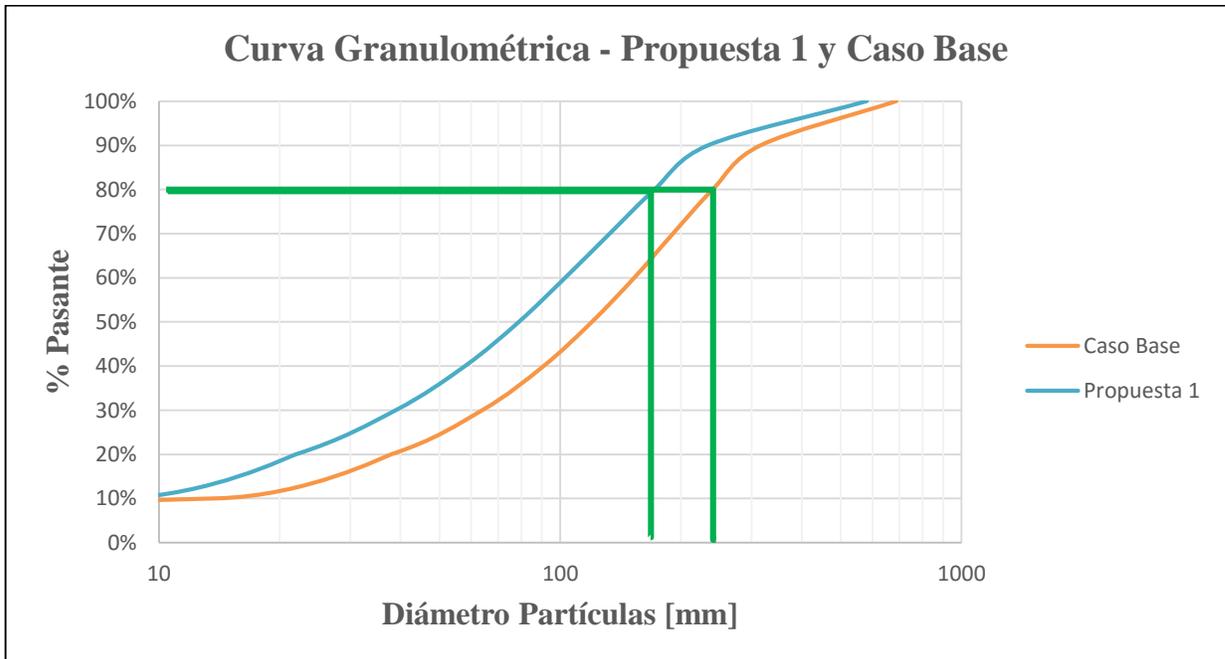


Figura 70. Curva granulométrica caso base y propuesta 1.

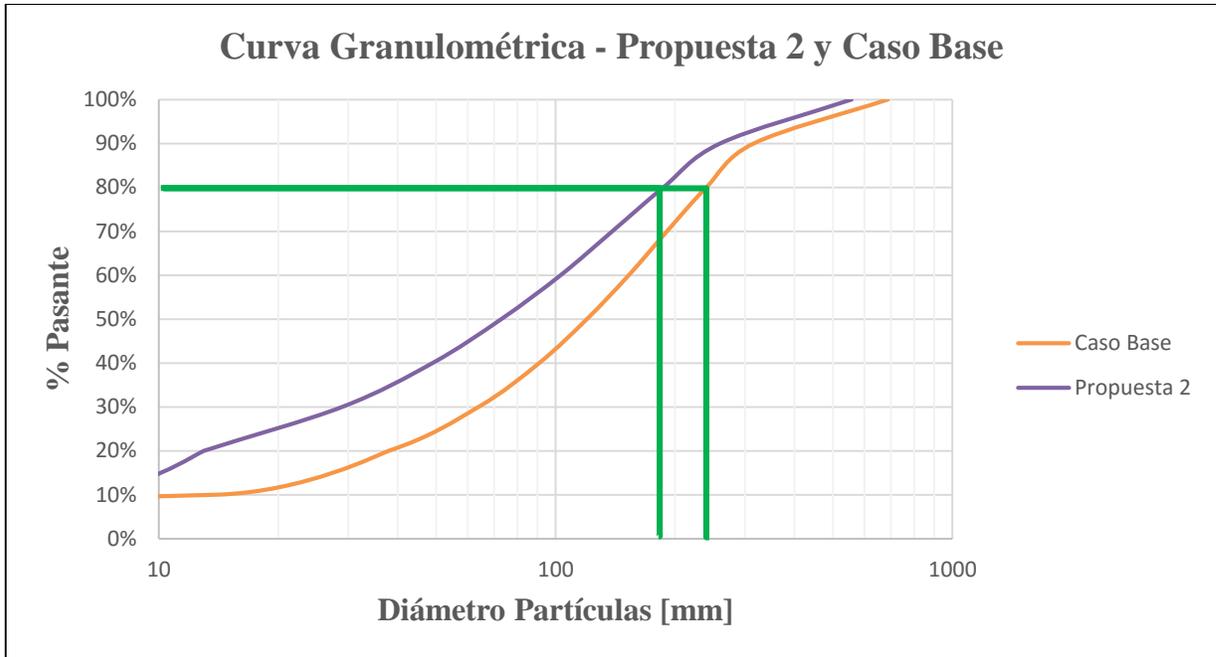


Figura 71. Curva granulométrica caso base y propuesta 2.

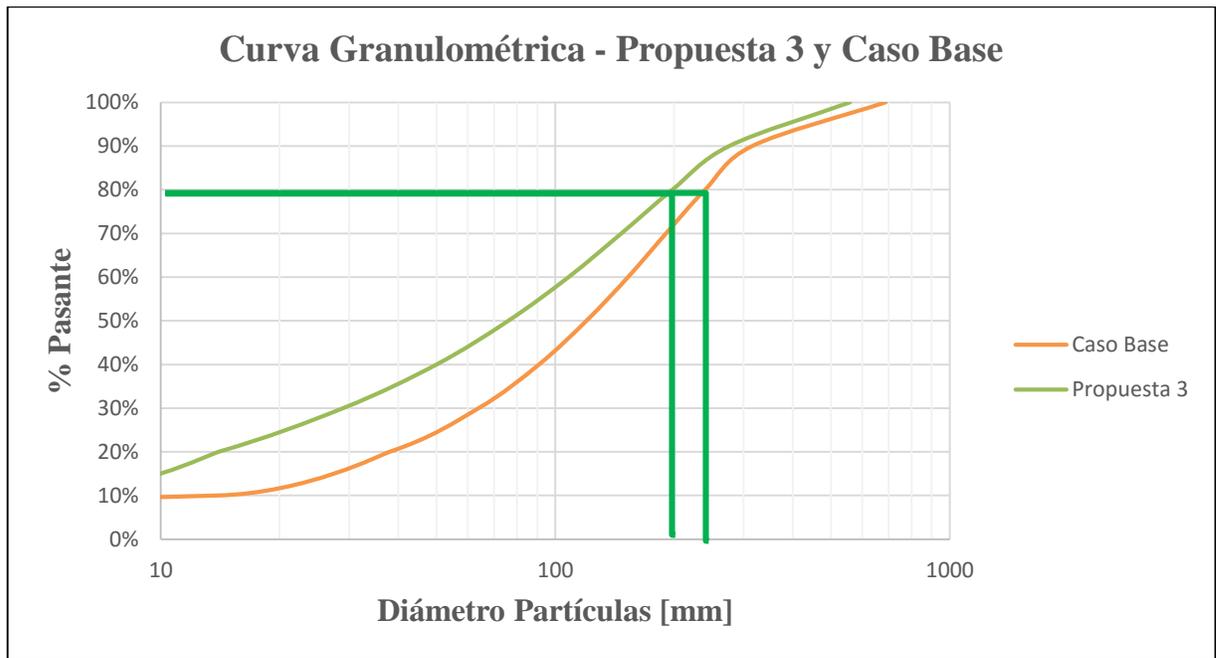


Figura 72. Curva granulométrica caso base y propuesta 3.

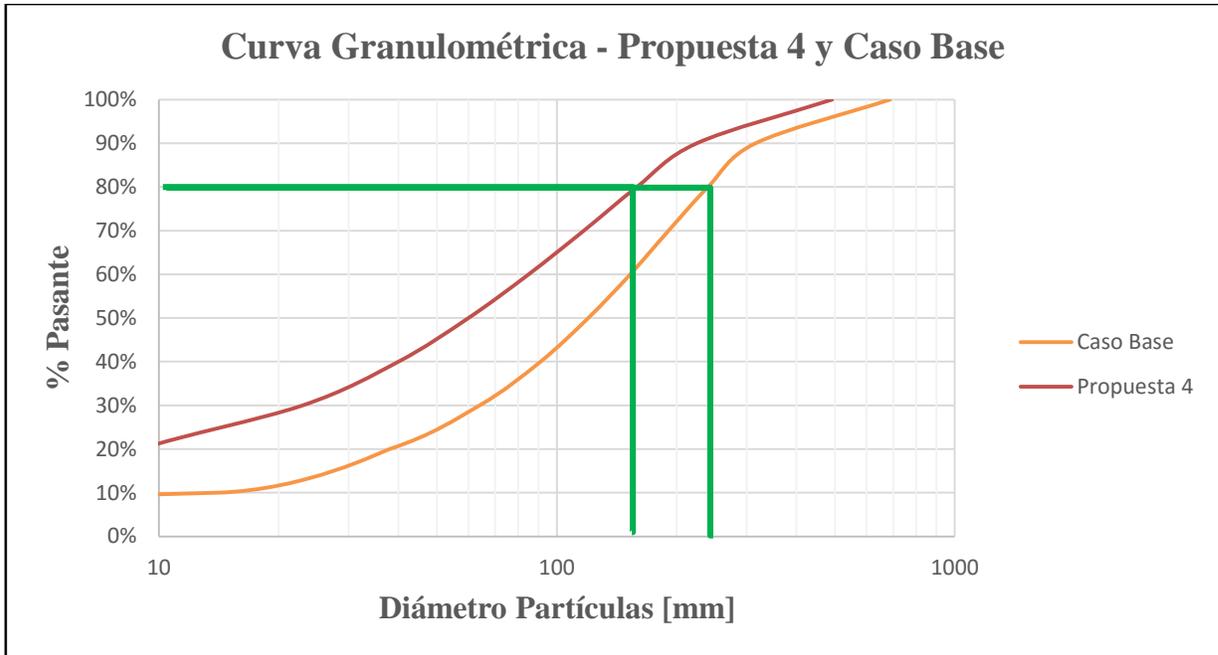


Figura 73. Curva granulométrica caso base y propuesta 4.

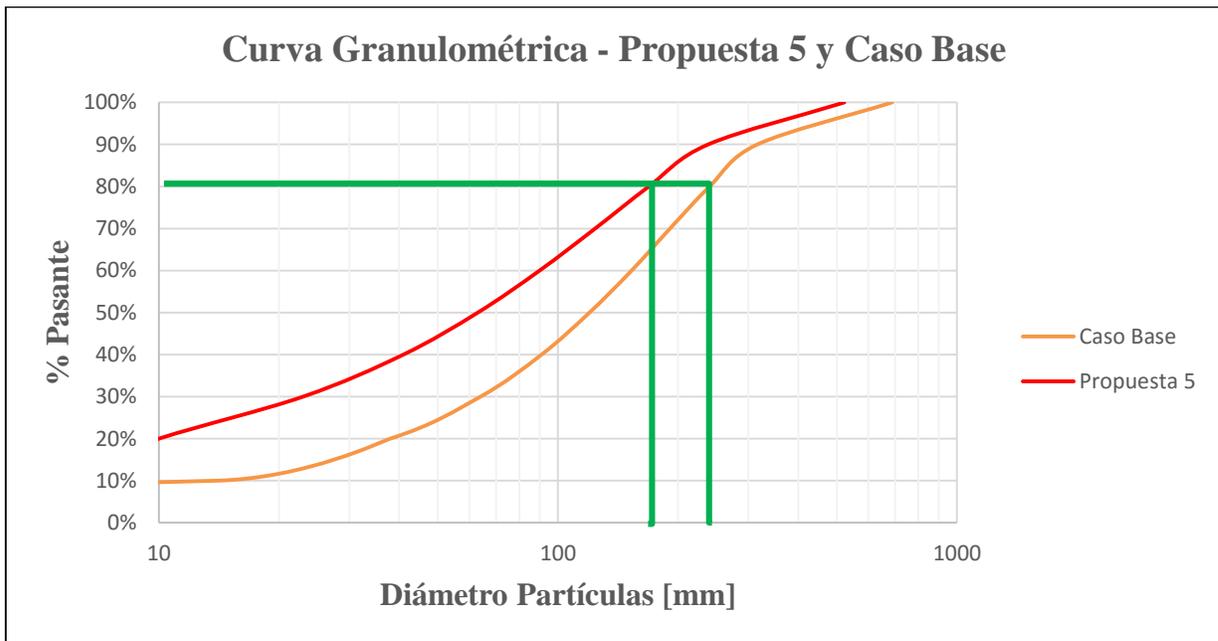


Figura 74. Curva granulométrica caso base y propuesta 5.

A continuación se da a conocer una tabla resumen de las propuestas y el caso base:

Tabla 29. Tabla resumen propuestas.

Tipo	Diámetro [“]	Malla (BxE)	Explosivo	Taco [m]	Pasante<1”	P80 [“]	Tonelaje Pozo
Caso Base	10 5/8	6x7	Fortis Extra 65	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	15%	9,5	1.644
Propuesta 1	10 5/8	6x7	Vistis 225	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	22%	6,8	1.644
Propuesta 2	10 5/8	5,5x5,5	Vistis 225	6	28%	7,4	1.184
Propuesta 3	10 5/8	5,5x5,5	Vistis 225	6,5	28%	7,8	1.184
Propuesta 4	10 5/8	5x5	Vistis 225	6	31%	6,3	979
Propuesta 5	10 5/8	5x5	Vistis 225	6,5	31%	6,7	979

Se añade un gráfico con todas las propuestas y el caso base:

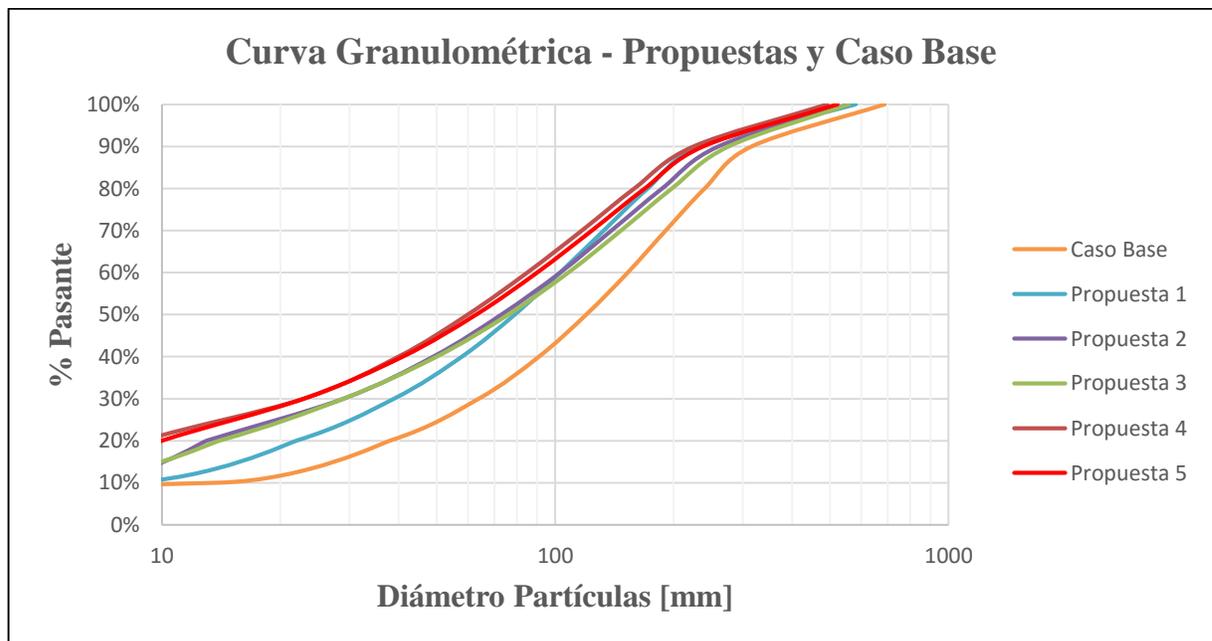


Figura 75. Curvas granulométricas de propuestas y caso base.

Tabla 30. Tabla resumen económico propuestas.

Tipo	Costo Final por ton. (PyT) [USD/ton]	Malla (BxE)	Factor de Carga [g/ton]	Factor de Carga ANFO eq. [g/ton]	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]
Caso Base	0,502	6x7	435	544	1,25
Propuesta 1	0,714	6x7	438	614	1,41
Propuesta 2	0,955	5,5x5,5	609	853	1,96
Propuesta 3	0,917	5,5x5,5	578	810	1,86
Propuesta 4	1,155	5x5	736	1.032	2,37
Propuesta 5	1,109	5x5	700	980	2,25

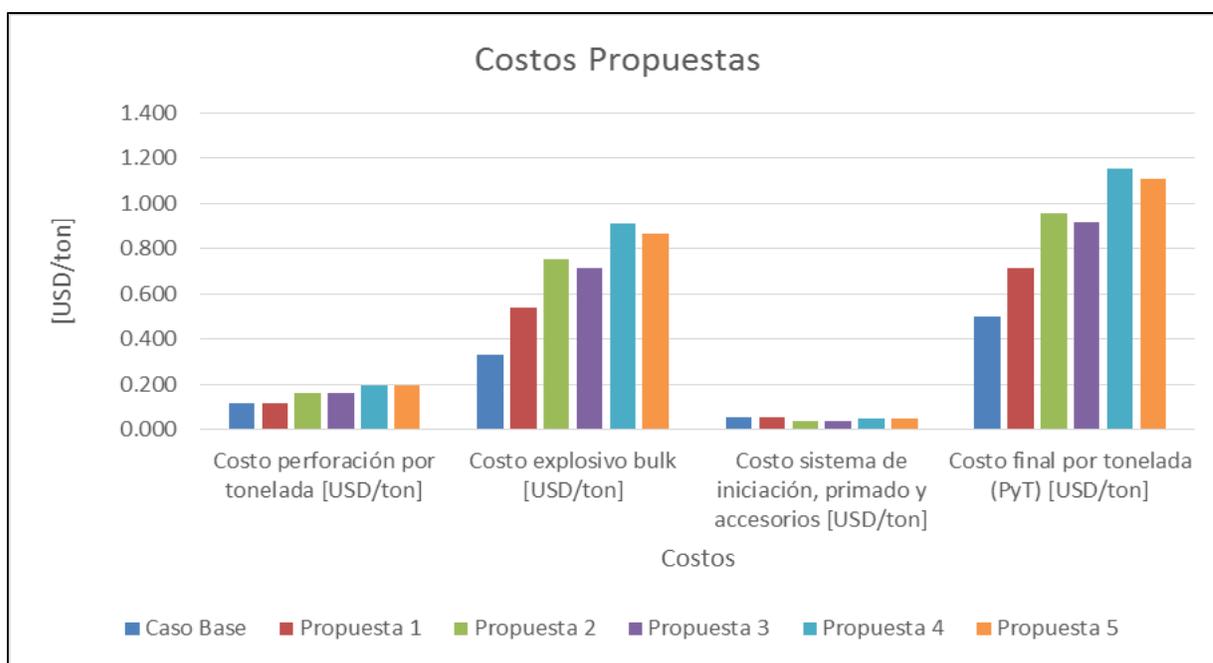


Figura 76. Resumen costos propuestas.

4.2 Resultados Demoblast

4.2.1 Resultados pruebas tronadura caso histórico

Se tiene que los costos obtenidos para los distintos meses y cuartiles, en cuanto a tronadura, son los siguientes:

Tabla 31. Costos tronadura período 2015.

Mes	Costo [USD/ton]	Toneladas quebradas	[USD]
Enero	0,2	5.944.593	1.188.919
Febrero	0,21	6.235.306	1.309.414
Marzo	0,22	6.479.208	1.425.426
Total 1er cuartil		18.659.107	3.923.759
Abril	0,21	7.495.114	1.573.974
Mayo	0,21	6.819.050	1.432.001
Junio	0,21	6.819.050	1.432.001
Total 2do cuartil		21.133.214	4.437.975
Julio	0,26	4.798.659	1.247.651
Agosto	0,19	7.085.503	1.346.246
Septiembre	0,31	3.821.854	1.184.775
Total 3er cuartil		15.706.016	3.778.672
Octubre	0,24	2.185.434	524.504
Total		57.683.771	12.664.909

Los resultados obtenidos para los distintos meses y cuartiles, en cuanto a perforación son los siguientes:

Tabla 32. Costos perforación período 2015.

Mes	Costo [USD/m]	Metros perforados	[USD]
Enero	12	51.315	615.780
Febrero	12	37.290	447.480
Marzo	12	53.493	641.916
Total 1er cuartil		142.098	1.705.176
Abril	12	65.357	784.278
Mayo	12	58.212	698.544
Junio	12	44.237	530.838
Total 2do cuartil		167.805	2.013.660
Julio	12	47.718	572.616
Agosto	12	52.965	635.580
Septiembre	12	30.360	364.320
Total 3er cuartil		131.043	1.572.516
Octubre	12	24.965	299.574
Total		465.911	5.590.926

4.2.2 Resultados Demoblast caso específico

El día miércoles 10 de junio de 2015, se realizó el caso base para las “Demoblast”, correspondiente al proyecto de implementación del nuevo explosivo Vistis y Vistan 225 en SCM El Abra, en la fase 13 banco 3625.

Se obtienen los siguientes resultados y análisis técnico-económico para el caso base:

Tabla 33. Parámetros caso base para las Demoblast.

	Parámetros	Caso Base
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	6
	Espaciamiento [m]	7
	Relación (E/B)	1,17
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1644
	IP [ton/m]	103
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Fortis Extra 65
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	680
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Fortis Extra 65
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,25
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	435
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	544
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2.057
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,25
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,117
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,502
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,385

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo del caso base se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-

kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

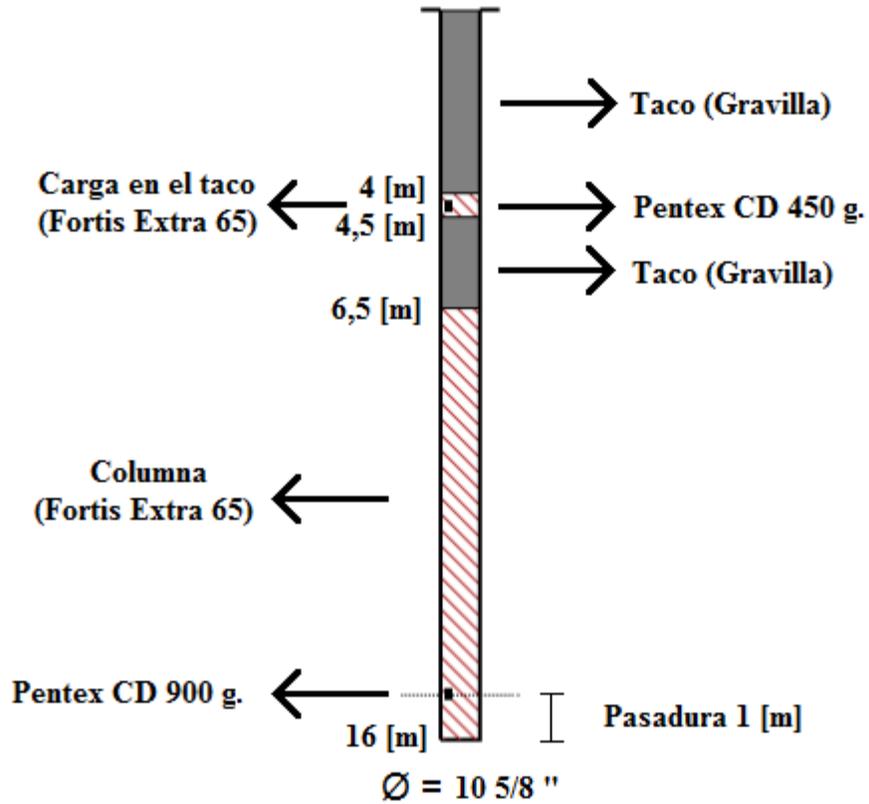


Figura 77. Carguío del pozo caso base para las Demoblast.

En cuanto a los resultados de fragmentación para el caso base:

Tabla 34. Porcentaje pasante caso base para las Demoblast.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	15
20	36
30	64
40	95
50	125
60	155
70	184
80	222
90	272
100	398

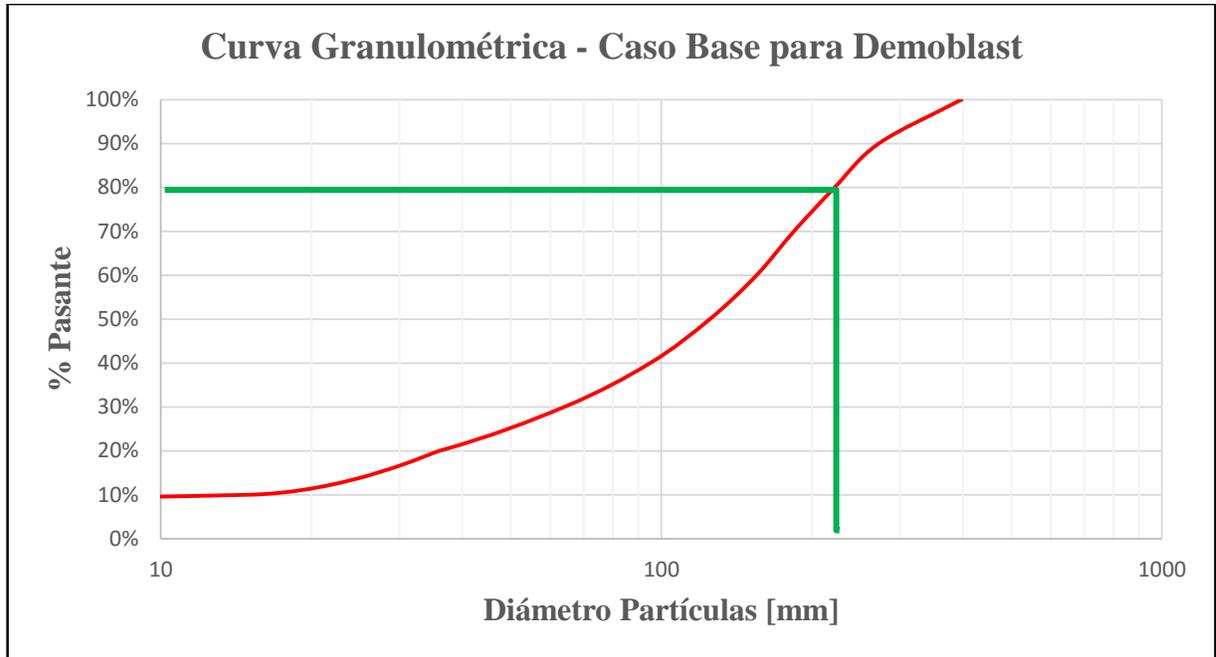


Figura 78. Curva granulométrica caso base para las Demoblast.

Luego para la primera “Demoblast” realizada el día miércoles 17 de junio de 2015 en la fase 13 banco 3625, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y parámetros:

Tabla 35. Parámetros 1° Demoblast.

	Parámetros	1° Demoblast
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	5
	Espaciamiento [m]	5
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	979
	IP [ton/m]	61
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	685
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,26
	Densidad Lineal [kg/m]	72
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	736
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	1032
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2322
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	2,37
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,196
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	1,200
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	1,004

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la primera “Demoblast” se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

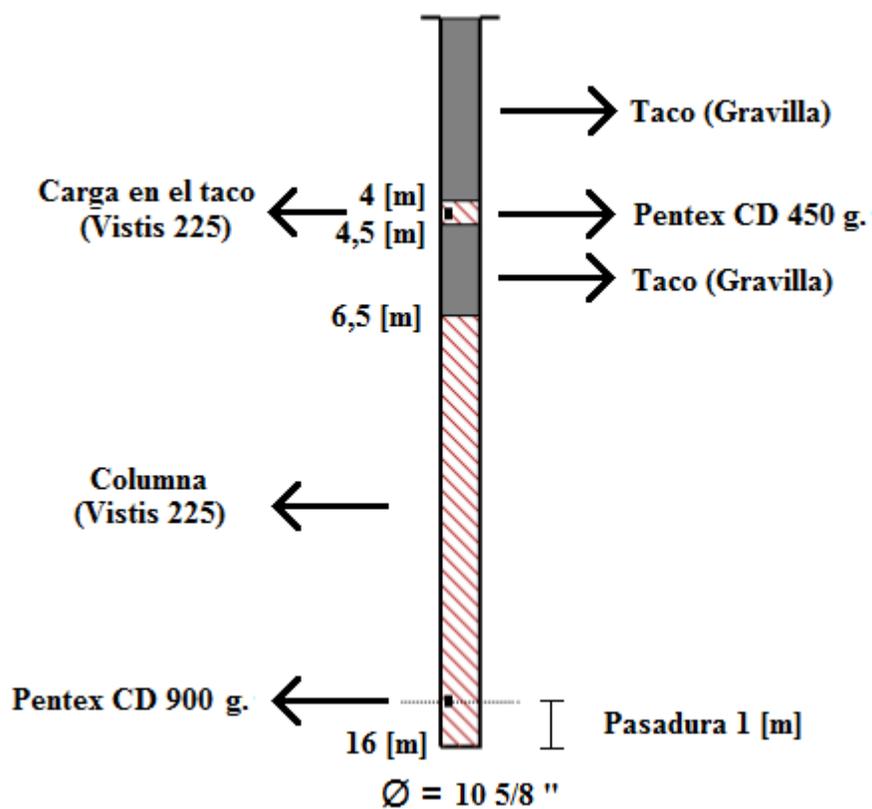


Figura 79. Carguío del pozo 1° Demoblast.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la 1° “Demoblast”:

Tabla 36. Porcentaje pasante 1° Demoblast.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	9
20	19
30	29
40	40
50	53
60	68
70	87
80	114
90	158
100	565

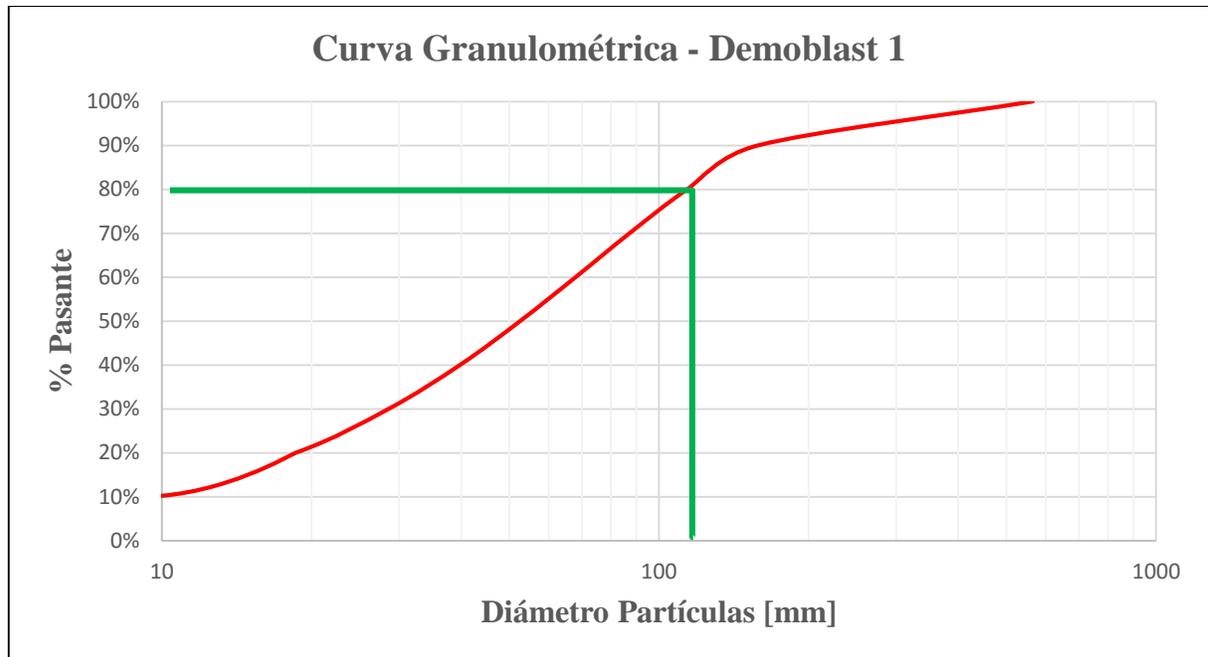


Figura 80. Curva granulométrica 1° Demoblast.

Luego para la tercera “Demoblast” realizada el día jueves 30 de julio de 2015 en la fase 13-14 banco 3610, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y parámetros:

Tabla 37. Parámetros 3° Demoblast.

	Parámetros	3° Demoblast
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	6
	Espaciamiento [m]	6
	Relación (E/B)	1
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1409
	IP [ton/m]	88
Columna	Taco [m]	6
	Explosivo [tipo]	Vistan 225
	Densidad Lineal [kg/m]	72,6
	Longitud de Carga [m]	9,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	690
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Vistan 225
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,27
	Densidad Lineal [kg/m]	72,6
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	515
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	722
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2316
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,64
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,136
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,815
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,679

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la tercera “Demoblast” se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

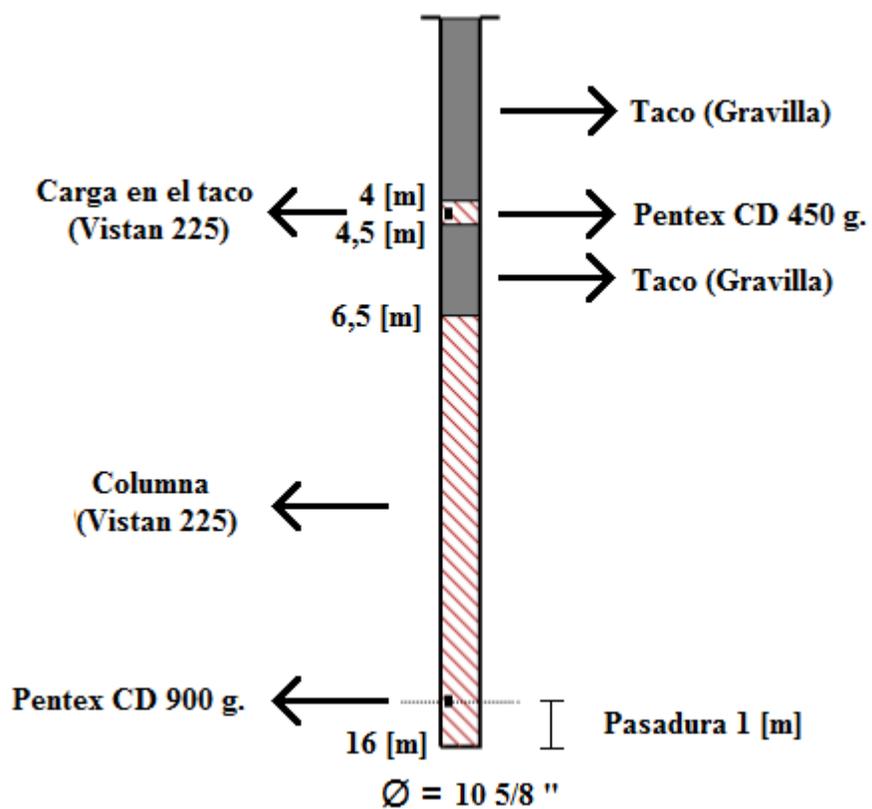


Figura 81. Carguío del pozo 3° Demoblast.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la 3° “Demoblast”:

Tabla 38. Porcentaje pasante 3° Demoblast.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	17
20	28
30	39
40	51
50	63
60	76
70	93
80	114
90	146
100	388

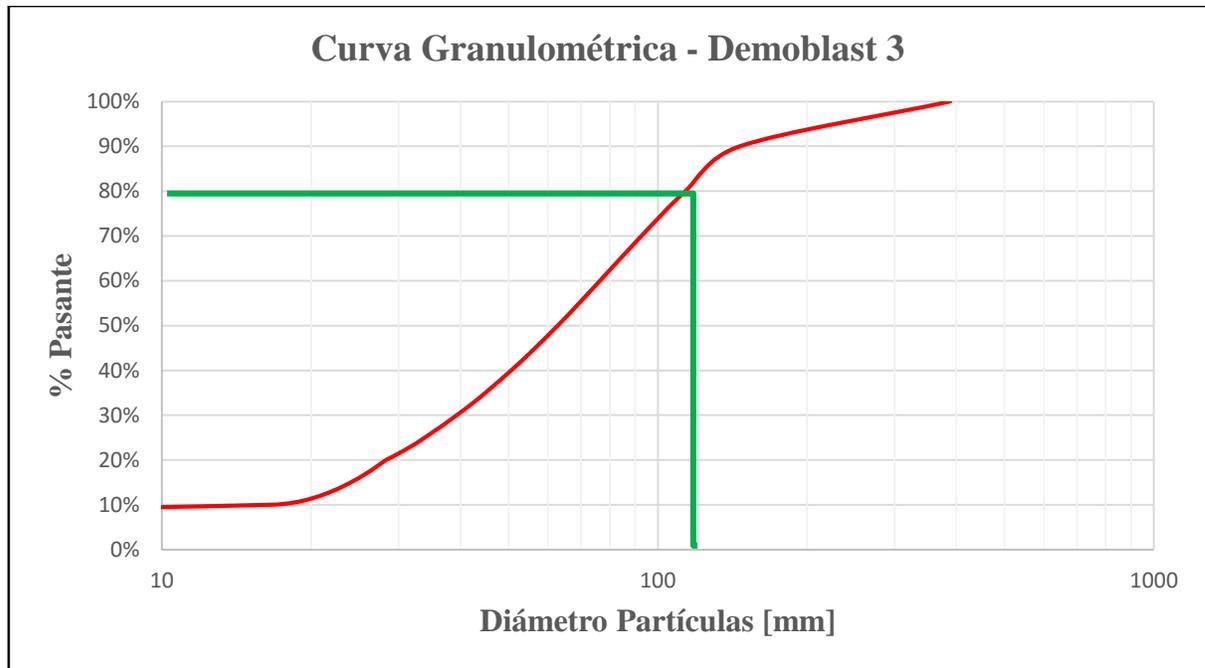


Figura 82. Curva granulométrica 3° Demoblast.

Luego para la cuarta “Demoblast” realizada el día viernes 14 de agosto de 2015 en la fase 13 banco 3610, en cuanto a la alternativa en uso de explosivo se obtienen los siguientes resultados y parámetros:

Tabla 39. Parámetros 4° Demoblast.

	Parámetros	4° Demoblast
Diseño de Malla	Altura de Banco [m]	15
	Densidad de Roca [g/cm ³]	2,61
	Diámetro ["]	10 5/8
	Burden [m]	6
	Espaciamiento [m]	7
	Relación (E/B)	1,17
	Pasadura [m]	1
	Toneladas por pozo	1644
	IP [ton/m]	103
	Columna	Taco [m]
Explosivo [tipo]		Vistis 225
Densidad Lineal [kg/m]		72,6
Longitud de Carga [m]		9,5
Carga por Pozo [kg/pozo]		690
Carga en el Taco	Explosivo [tipo]	Vistis 225
	Densidad de Explosivo [g/cm ³]	1,27
	Densidad Lineal [kg/m]	72,6
	Longitud de Carga [m]	0,5
	Carga por Pozo [kg/pozo]	36
Total	Factor de Carga Total [g/ton]	442
	Factor de Carga Total ANFO eq. [g/ton]	620
	Energía Efectiva Total [MJ/pozo]	2316
	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]	1,41
Costos	Costo perforación por metro [USD/m]	12
	Costo perforación por ton. [USD/ton]	0,117
	Costo Final por ton. (P&T) [USD/ton]	0,719
	Precio por tonelada (Tronadura) [USD/ton]	0,602

Para observar gráficamente la forma de carguío del pozo de la cuarta “Demoblast” se tiene lo siguiente, considerando carga en el taco, donde la carga de fondo posee un Pentex CD de 900 [g] y en el carguío intermedio un Pentex CD de 450 [g], además de tener en cuenta el uso de 2 detonadores i-kon RX de 20 metros y 2 detonadores Exel MS de 21,3 metros y cable de conexión i-kon del largo del Burden:

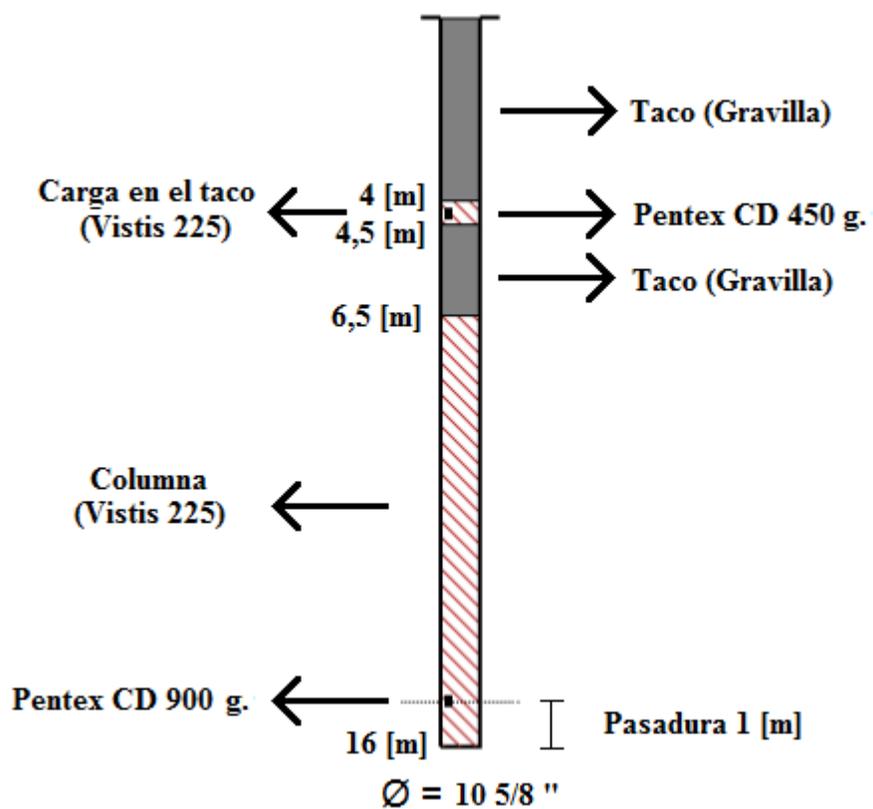


Figura 83. Carguío del pozo 4° Demoblast.

En cuanto a los resultados de fragmentación para la 4° “Demoblast”:

Tabla 40. Porcentaje pasante 4° Demoblast.

% Pasante	Tamaño [mm]
0	0
10	12
20	20
30	28
40	35
50	43
60	52
70	63
80	77
90	98
100	717

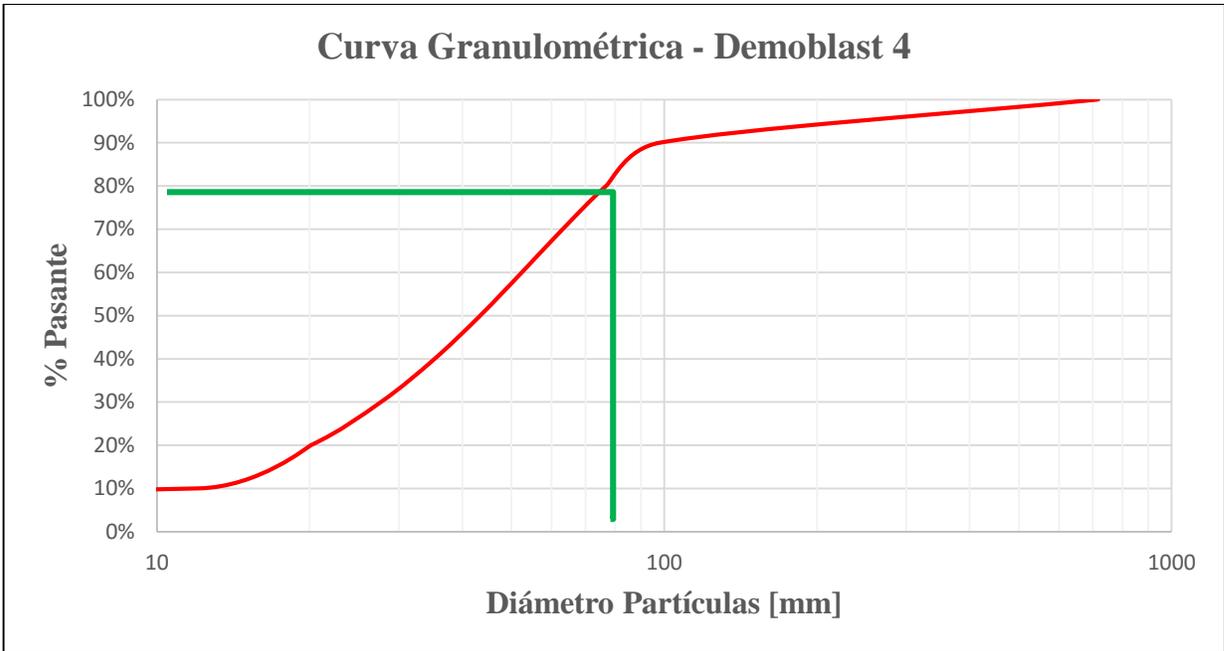


Figura 84. Curva granulométrica 4° Demoblast.

A modo de comparación, se grafican los casos bases con las distintas “Demoblast”:

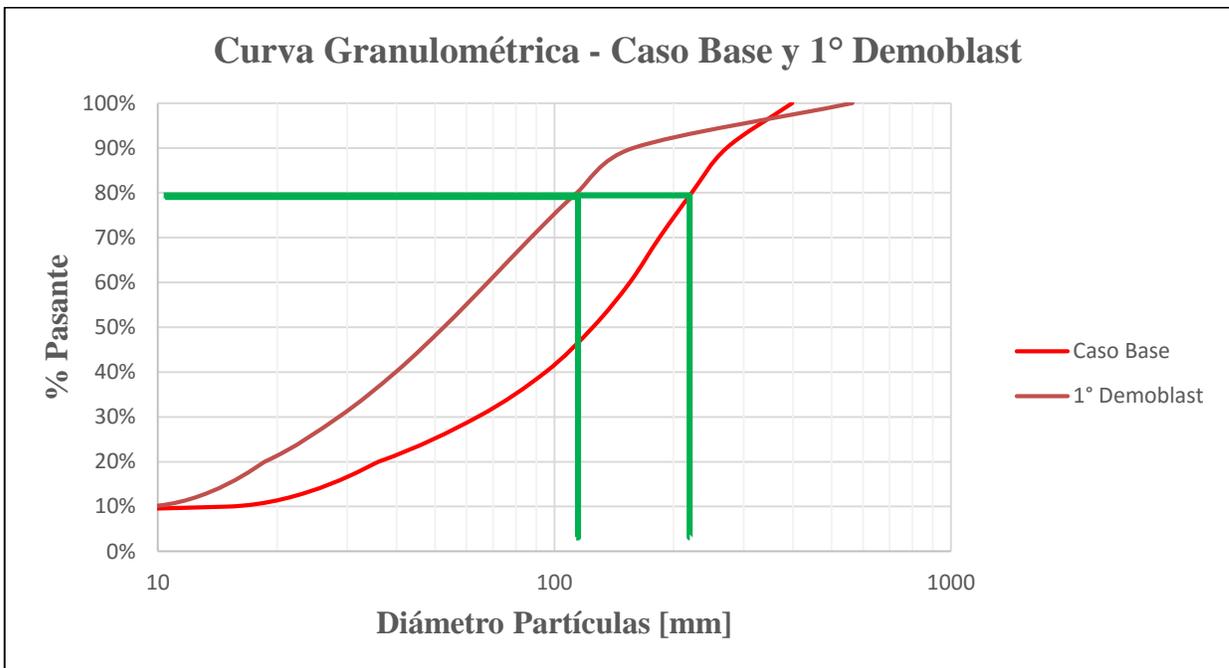


Figura 85. Curva granulométrica caso base y 1° Demoblast.

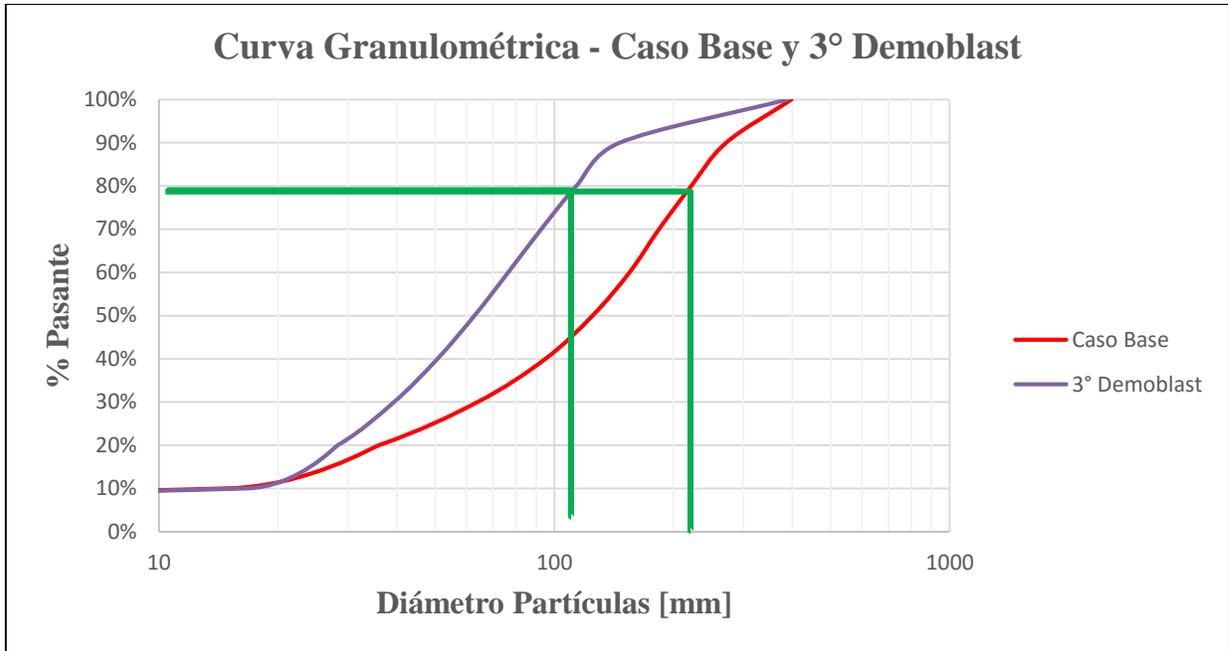


Figura 86. Curva granulométrica caso base y 3° Demoblast.

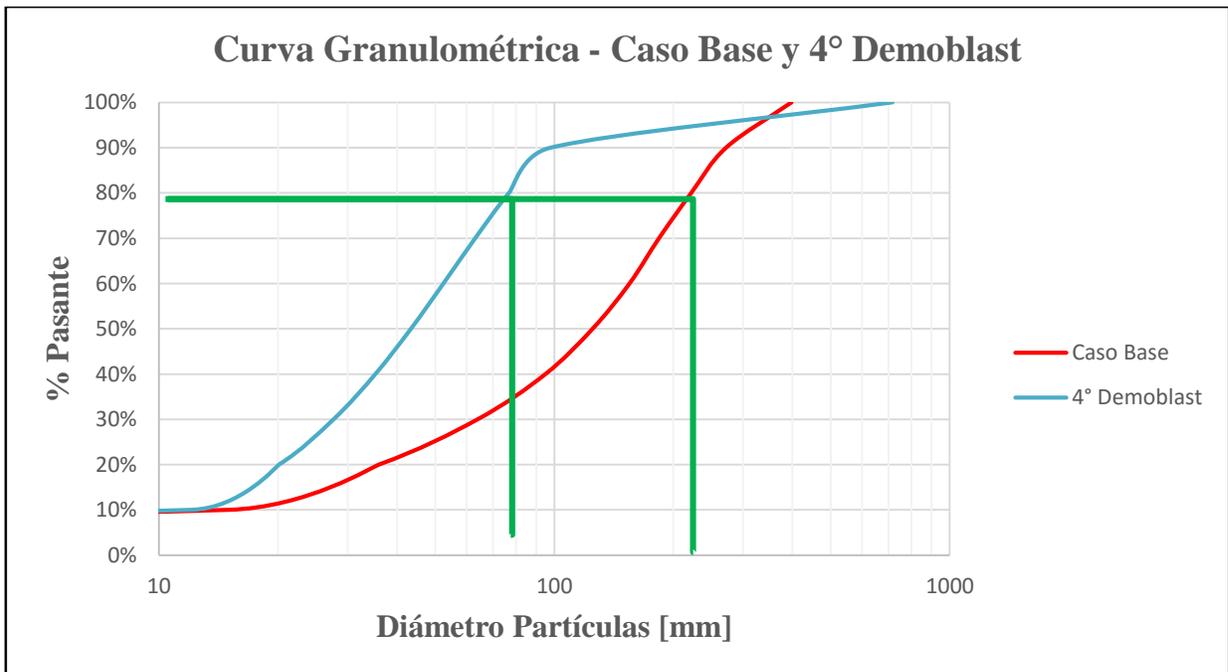


Figura 87. Curva granulométrica caso base y 4° Demoblast.

A continuación se da a conocer una tabla resumen de las “Demoblast” y el caso base:

Tabla 41. Tabla resumen Demoblast.

Tipo	Diámetro [“]	Malla (BxE)	Explosivo	Taco [m]	Pasante<1”	P80 [“]	Tonelaje Pozo
Caso Base	10 5/8	6x7	Fortis Extra 65	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	15%	8,74	1.644
1° Demoblast	10 5/8	5x5	Vistis 225	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	28%	4,5	979
3° Demoblast	10 5/8	6x6	Vistan 225	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	17%	4,5	1.409
4° Demoblast	10 5/8	6x7	Vistis 225	4 + 2 (Carga en el taco: 0,5)	28%	3,03	1.644



Figura 88. Comparación granulometría con escalímetro.

Se añade un gráfico con las “Demoblast” y el caso base:

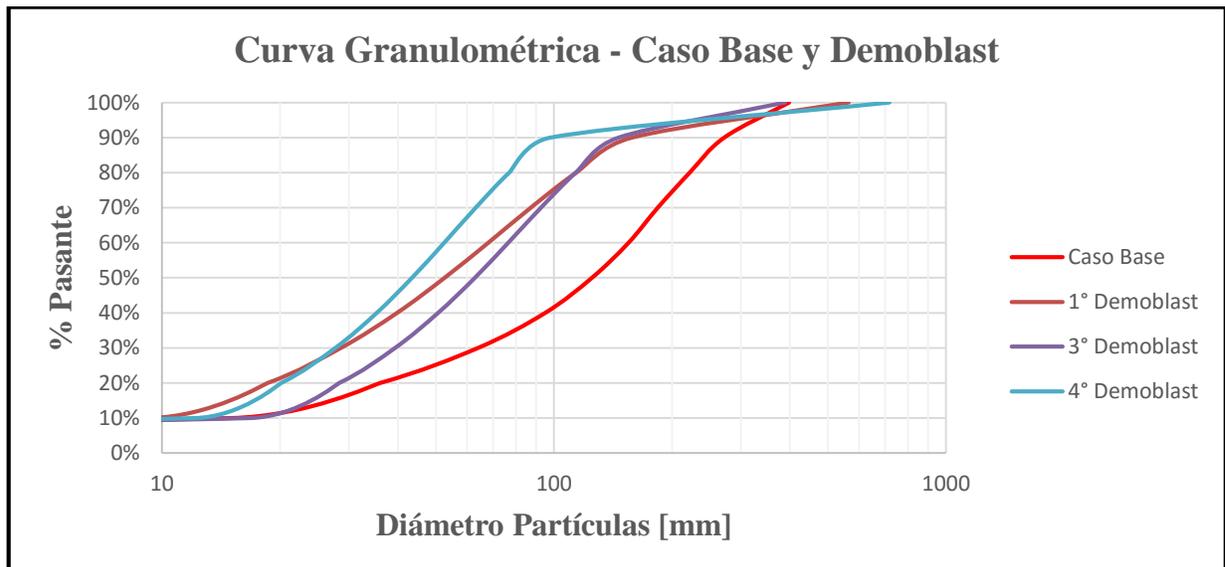


Figura 89. Curvas granulométricas caso base y las Demoblast.

Tabla 42. Tabla resumen económico Demoblast.

Tipo	Costo Final por ton. (PyT) [USD/ton]	Malla (BxE)	Factor de Carga [g/ton]	Factor de Carga ANFO eq. [g/ton]	Energía Efectiva Total por ton. [MJ/ton]
Caso Base	0,502	6x7	435	544	1,25
1° Demoblast	1,200	5x5	736	1032	2,37
3° Demoblast	0,815	6x6	515	722	1,64
4° Demoblast	0,719	6x7	442	620	1,41

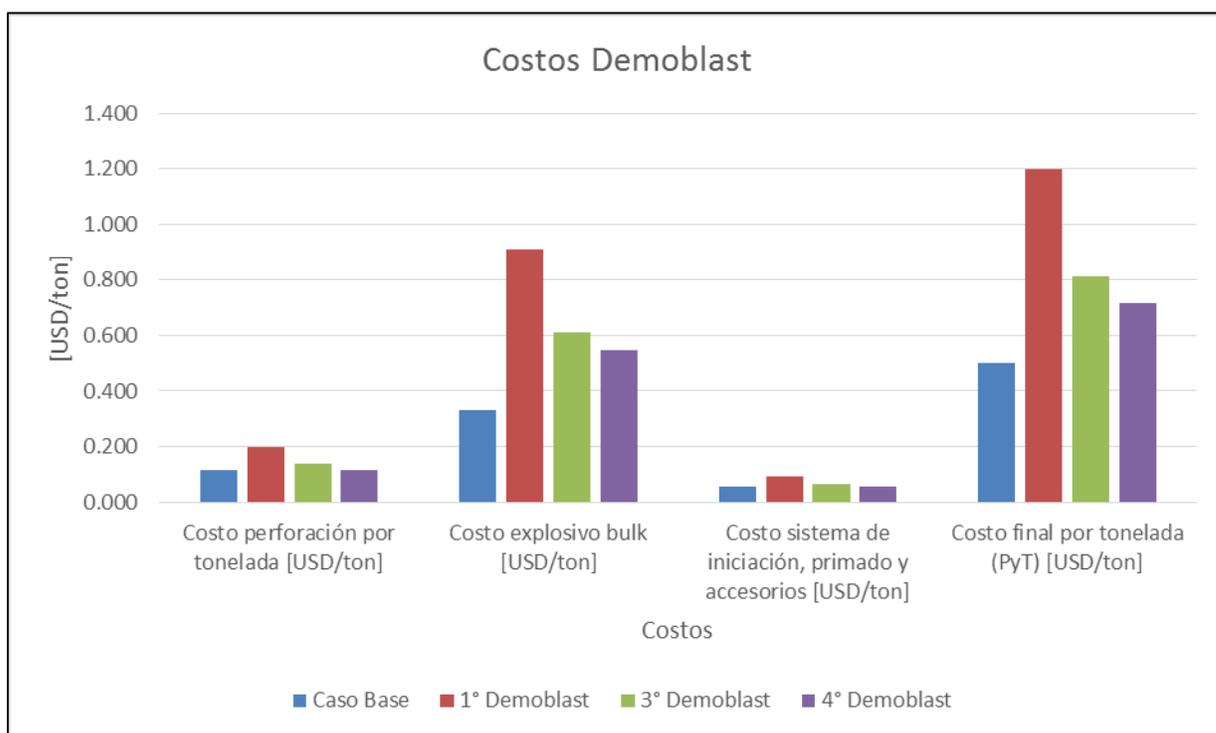


Figura 90. Resumen costos Demoblast.

4.3 Resultados rendimiento chancador

4.3.1 Resultados rendimiento chancador caso histórico

Se tiene que se analizó el primer cuartil, compuesto por los meses Enero, Febrero y Marzo, donde se obtuvo la potencia y tonelaje promedio asociado a cada mes y al cuartil.

Tabla 43. Promedio rendimiento chancador 1er cuartil caso histórico.

	Enero	Febrero	Marzo	Promedio
Tonelaje/h	5.087	5.640	5.852	5.527
Potencia [kW/h]	249	305	283	279

Además se analizó el tercer cuartil, compuesto por los meses Julio, Agosto y Septiembre, donde se obtuvo la potencia y tonelaje promedio asociado a cada mes y al cuartil.

Tabla 44. Promedio rendimiento chancador 3er cuartil caso histórico.

	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Tonelaje/h	5.843	5.583	6.438	5.955
Potencia [kW/h]	267	254	302	274

Luego, visualizando los resultados por mes para los distintos cuartiles, en cuanto a costo de potencia y dólares aportados por el tonelaje pasante del chancador se tiene:

Tabla 45. Costos y dólares aportados por tonelaje por mes (1er cuartil).

Mes	Ley [%]	Costo Potencia [USD]	USD aportados por tonelaje pasante de cobre
Enero	0,279	15.931	40.653.867
Febrero	0,284	18.764	44.130.515
Marzo	0,307	17.114	48.592.428
Total	-	51.809	133.376.810

Tabla 46. Costos y dólares aportados por tonelaje por mes (3er cuartil).

Mes	Ley [%]	Costo Potencia [USD]	USD aportados por tonelaje pasante de cobre
Julio	0,306	18.164	54.483.908
Agosto	0,337	15.906	52.723.208
Septiembre	0,332	20.340	64.436.373
Total	-	54.411	171.643.489

Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a los dólares aportados por el tonelaje pasante del chancador y los costos energéticos asociados para el caso de los cuartiles:

Tabla 47. Costos energéticos asociados a chancador y USD por tonelaje caso histórico por cuartil.

Cuartil	Costo Potencia [USD]	USD aportados por tonelaje pasante de cobre
E-F-M	51.809	141.260.410
J-A-S	54.411	162.540.237
Total	106.219	303.800.647

4.3.2 Resultados rendimiento chancador caso específico

Se tomaron los datos para el caso base y la 1°, 3° y 4° “Demoblast” con respecto al rendimiento del chancador, los cuales incluyen potencia y tonelaje de este.

Tabla 48. Tonelaje-hora y potencia para distintas tronaduras.

	Tonelaje/hora	Potencia [kW/h]
Caso Base	6.965	312
1° Demoblast (Vistis 225)	5.764	276
3° Demoblast (Vistan 225)	6.460	325
4° Demoblast (Vistis 225)	7.034	359
Promedio	6.556	318

Por lo tanto, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a los dólares aportados por el tonelaje pasante del chancador y los costos energéticos asociados para el caso de las distintas tronaduras:

Tabla 49. Costos energéticos asociados a chancador y USD por tonelaje pasante caso específico por tronadura.

	Ley Promedio utilizada [%]	Costo Potencia [USD]	USD aportados por Tonelaje
Caso Base	0,329	775	2.548.385
1° Demoblast	0,329	684	2.106.750
3° Demoblast (Vistan 225)	0,329	817	2.389.851
4° Demoblast (Vistis 225)	0,329	949	2.736.732
Total	-	3.226	9.781.718

4.4 Resultados pérdidas cargas redireccionadas por fragmentación gruesa

4.4.1 Resultados pérdidas cargas redireccionadas caso histórico

Se tienen los siguientes resultados para las cargas redireccionadas por mes para los distintos cuartiles, donde se obtienen las toneladas de cobre perdidas en cargas redireccionadas, esto hace referencia a cargas de camión que debían ir a chancador pero por problemas de fragmentación tuvieron otro destino, y el costo asociado a estas pérdidas de material:

Tabla 50. Costos asociados a cargas redireccionadas por mes (1er cuartil).

Mes	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Total CRD [%]	Ley promedio [%]	Cobre CRD [Ton]	USD de cobre CRD
Enero	121.484	6.907.406	1,76	0,238	289	1.485.584
Febrero	131.406	6.279.416	2,09	0,238	312	1.606.916
Marzo	124.388	6.318.378	1,97	0,238	295	1.521.096
Total	377.278	19.505.200	1,93	-	896	4.613.596

Tabla 51. Costos asociados a cargas redireccionadas por mes (3er cuartil).

	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Total CRD [%]	Ley promedio [%]	Cobre CRD [Ton]	USD de cobre CRD
Julio	30.492	7.164.410	0,43	0,238	72	372.876
Agosto	10.406	6.975.892	0,15	0,238	25	127.251
Septiembre	2.904	2.405.722	0,12	0,238	7	35.512
Total	43.802	16.546.024	0,26	-	104	535.639

Además se tienen los costos asociados a cargas redireccionadas por cuartil:

Tabla 52. Costos asociados a cargas redireccionadas por cuartil.

	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Total CRD [%]	Ley promedio [%]	Cobre CRD [Ton]	USD de cobre CRD
E-F-M	377.278	19.505.200	1,93	0,238	896	4.613.596
J-A-S	43.802	16.546.024	0,26	0,238	104	535.639
Total	421.080	36.051.224	1,17	-	1.000	5.149.235

4.4.2 Resultados pérdidas cargas redireccionadas caso específico

Se tienen los siguientes resultados para las cargas redireccionadas para las distintas tronaduras realizadas, donde se obtienen las toneladas de cobre perdidas en cargas redireccionadas, esto hace referencia a cargas de camión que debían ir a chancador pero por problemas de fragmentación tuvieron otro destino, y el costo asociado a estas pérdidas de material:

Tabla 53. Costos asociados a cargas redireccionadas por tronadura caso específico.

Tronadura	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Total CRD [%]	Ley promedio [%]	Cobre CRD [Ton]	USD de cobre CRD
Caso Base	484	253.132	0,19	0,259	1	6.454
1° Demoblast	2.178	234.132	0,93	0,259	6	29.045
3° Demoblast	-	247.566	0	0,259	-	-
4° Demoblast	-	274.670	0	0,259	-	-
Total	2.662	1.009.500	0,28	-	7	35.499

4.5 Resultados Flujo de caja

4.5.1 Resultados Flujo de caja caso histórico

En cuanto al flujo de caja para el caso histórico, para el primer cuartil y el tercer cuartil se tiene:

Tabla 54. Flujo de caja caso histórico.

	E-F-M (1er Q)	J-A-S (3 Q)
Mayor tonelaje pasante de cobre [USD]	141.260.410	162.540.237
Pérdidas por cargas redireccionadas [USD]	-4.613.596	-535.639
Costo energético [USD]	-51.809	-54.411
Costo Perforación y Tronadura [USD]	-5.628.935	-5.351.188
Total [USD]	130.966.071	156.599.000

Sin embargo, el dinero aportado por el tonelaje pasante de cobre es significativamente mayor a las demás actividades y además no es consecuencia directa del uso de explosivo de alta energía solamente, por ende, se tiene una tabla resumen con los costos solamente para a posterior realizar un mejor análisis:

Tabla 55. Flujo de caja histórico (costos).

	E-F-M (1er Q)	J-A-S (3 Q)
Pérdidas por cargas redireccionadas [USD]	-4.613.596	-535.639
Costo energético [USD]	-51.809	-54.411
Costo Perforación y tronadura [USD]	-5.628.935	-5.351.188
Total [USD]	-10.294.339	-5.941.237

4.5.2 Resultados Flujo de caja caso específico

En cuanto al flujo de caja para el caso específico para las distintas tronaduras de prueba realizadas en terreno se tiene:

Tabla 56. Flujo de caja caso específico.

	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Mayor tonelaje pasante de cobre [USD]	2.548.385	2.106.750	2.389.851	2.736.732
Costo energético [USD]	-775	-684	-817	-949
Pérdidas por cargas redireccionadas [USD]	-6,454	-29,045	-	-
Costo perforación y tronadura [USD]	-826	-1.174	-1.149	-1.182
Total [USD]	2.540.330	2.075.846	2.387.886	2.734.601

Sin embargo, el dinero aportado por el tonelaje pasante de cobre es significativamente mayor a las demás actividades y además no es consecuencia directa del uso de explosivo de alta energía solamente, por ende, se tiene una tabla resumen con los costos solamente para a posterior realizar un mejor análisis:

Tabla 57. Flujo de caja específico (costos).

	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Costo energético [USD]	-775	-684	-817	-949
Pérdidas por cargas redireccionadas [USD]	-6.454	-29.045	-	-
Costo perforación y tronadura [USD]	-826	-1.174	-1.149	-1.182
Total [USD]	-8.056	-30.904	-1.965	-2.131

4.6 Análisis propuestas simuladas

Se logra un incremento en el beneficio de la fragmentación en todas las propuestas al comparar el P80 del caso base con los de las propuestas, además también se logra un incremento en las propuestas analizando el porcentaje menor a 1 pulgada. Se desprende que el mayor incremento en beneficio en lo que respecta a P80 se logra en la propuesta 4, esto se atribuye principalmente a que la malla de la propuesta 4 es una de las más pequeñas (5x5), por ende existe mayor interacción entre los pozos y en consecuencia, mayor fracturamiento, además el otro hecho, es que a diferencia de la propuesta 5, el taco se considera de 6 [m], por lo tanto la columna explosiva es de mayor longitud resultando en mayor explosivo y mayor energía para quebrar el material.

Para el caso del %<1" el mayor incremento en beneficio se encuentra en la propuesta 4 y 5 con un 107%, esto revela que a pesar de las características mencionadas anteriormente, en lo que respecta a las partículas de granulometría más pequeña, no existe mayor cambio entre una malla 5x5 con taco 6,5 [m] (propuesta 5) y una malla de 5x5 con taco de 6 [m].

Tabla 58. Incremento/disminución beneficio en fragmentación en propuestas.

	P80 ["]	%<1" ["]	Incremento/Disminución Beneficio P80 [%]	Incremento/Disminución Beneficio %<1" [%]
Caso Base	9,45	15	-	-
Propuesta 1	6,77	22	40	47
Propuesta 2	7,36	28	28	87
Propuesta 3	7,80	28	21	87
Propuesta 4	6,26	31	51	107
Propuesta 5	6,65	31	42	107

Del análisis técnico económico se tienen los siguientes porcentajes de incremento o disminución en los beneficios que conlleva cada una de las propuestas:

Tabla 59. Incremento/disminución beneficio en factor de carga total en propuestas.

	Factor de Carga Total [g/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	435	-
Propuesta 1	438	1
Propuesta 2	609	40
Propuesta 3	578	33
Propuesta 4	736	69
Propuesta 5	700	61

La totalidad de las propuestas conlleva un incremento en beneficio en factor de carga total, sin embargo, el mayor incremento se logra en la propuesta 4 con un 69%, esto se debe principalmente a que la columna explosiva en esta propuesta es de 10 [m] (al igual que en la propuesta 2 y 3 y el caso base) por lo tanto existe mayor cantidad de explosivo aumentando el factor de carga, la diferencia entre la propuesta 4 y las demás es el tonelaje a remover, ya que en la propuesta 4 es solo de 979 [ton] aproximadamente, debido a la dimensión de la malla (5x5), lo que provoca un aumento en el factor de carga total.

Tabla 60. Incremento/disminución beneficio en energía efectiva total por tonelada en propuestas.

	Energía Efectiva Total por tonelada [MJ/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	1,25	-
Propuesta 1	1,41	13
Propuesta 2	1,96	57
Propuesta 3	1,86	49
Propuesta 4	2,37	90
Propuesta 5	2,25	80

Todas las propuestas presentan un incremento en el beneficio en lo que respecta a energía efectiva total por tonelada, lo que demuestra que el explosivo Vistis 225 resulta ser de mayor energía que el Fortis Extra 65. El mayor incremento se genera en la propuesta 4, esto principalmente porque posee una malla de menor dimensión (5x5) y a diferencia de la propuesta 5, posee un taco más corto de 6 [m], por ende la columna explosiva es de mayor longitud.

Tabla 61. Incremento/disminución beneficio en costo perforación por tonelada en propuestas.

	Costo perforación por Tonelada [USD/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,117	-
Propuesta 1	0,117	0
Propuesta 2	0,162	-39
Propuesta 3	0,162	-39
Propuesta 4	0,196	-68
Propuesta 5	0,196	-68

En el costo de perforación por tonelada todas las propuestas presentan una disminución en el beneficio con excepción de la propuesta 1, esto se debe a que la propuesta 1 posee el mismo diseño de malla que el caso base (6x7), en cambio las demás propuestas presentan mallas de menores dimensiones, lo que provoca mayor gasto en perforación al realizarse mayor cantidad de pozos para un mismo tamaño. Cabe destacar que la mayor disminución en el beneficio lo poseen las propuestas 4 y 5, esto porque son las de mallas con menor dimensión (5x5).

Tabla 62. Incremento/disminución beneficio en precio por tonelada (Tronadura) en propuestas.

	Precio por tonelada (Tronadura)	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,385	-
Propuesta 1	0,598	-55
Propuesta 2	0,792	-106
Propuesta 3	0,755	-96
Propuesta 4	0,959	-149
Propuesta 5	0,913	-137

Se observa una disminución en el beneficio para todas las propuestas, esto en primera instancia se debe a que en todas las propuestas se utilizó el explosivo Vistis 225, el cual posee mayor valor que el Fortis Extra 65 utilizado en el caso base. Luego, se tiene que la propuesta con mayor aumento de precio por tonelada en tronadura es la 4, principalmente es consecuencia de que posee una mayor columna de explosivo (10 [m]) y además posee poco tonelaje a remover debido a la pequeña dimensión de la malla (5x5).

Tabla 63. Incremento/disminución beneficio en costo final por tronadura (PyT) en propuestas.

	Costo Final Por Tronadura (PyT) [USD/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,502	-
Propuesta 1	0,714	-42
Propuesta 2	0,955	-90
Propuesta 3	0,917	-83
Propuesta 4	1,155	-130
Propuesta 5	1,109	-121

Finalmente, para el costo final por proceso de perforación y tronadura, se tiene que todas las propuestas son más costosas, donde la que posee mayor aumento es la propuesta 4, debido principalmente al precio más elevado del explosivo Vistis 225, malla de menor dimensión (5x5) que en consecuencia resulta en menor tonelaje a remover (979 [ton]) y mayor columna de explosivo (10 [m]).

4.7 Análisis Demoblast

4.7.1 Análisis pruebas tronadura caso histórico

Para el caso del chancador en cuanto a los 3 meses en que no se utilizaba explosivo de alta energía (Enero-Febrero-Marzo) en comparación a los 3 meses en que se comenzó a utilizar, se tiene una reducción de un 5% en cuanto a los costos de perforación y tronadura. Esto se debe en primera

instancia al contexto minero en el cual se encuentra situado la minera, en el cual a partir de Septiembre se comenzó con una reducción del 50% de la producción, por lo tanto se traduce en una disminución en los costos de perforación y tronadura por existir mayor control y gestión en cuanto a las tronaduras, en cuanto al carguío de los explosivos y perforación.

Tabla 64. Costo perforación histórico.

Cuartil	Costo perforación [USD]	Disminución [%]
E-F-M	1.705.176	-
J-A-S	1.572.516	8

Tabla 65. Costo tronadura histórico.

Cuartil	Costo tronadura [USD]	Disminución [%]
E-F-M	3.923.759	-
J-A-S	3.778.672	4

Tabla 66. Costo perforación y tronadura histórico.

Cuartil	Costo PyT [USD]	Disminución [%]
E-F-M	5.628.935	-
J-A-S	5.351.188	5

4.7.2 Análisis Demoblast caso específico

Se logra un incremento en el beneficio en la fragmentación en todas las “Demoblast”, siendo el mayor aumento de un 188% comparando el P80 del caso base con el de la cuarta “Demoblast” y de un 87% analizando el porcentaje menor a 1 pulgada. Las ventajas alcanzadas en fragmentación se deben a que la 4° “Demoblast” aunque posee malla de mayor dimensión (6x7), provoca mayor interacción entre los pozos y así mayor efecto de la energía del explosivo para quebrar la roca, la diferencia con la tercera “Demoblast” o primera “Demoblast” se debe a que estas al poseer malla de menor dimensión pueden ocasionar un efecto de pérdida del confinamiento del explosivo, lo que le reduce energía a la hora de fragmentar la roca.

Tabla 67. Incremento/disminución beneficio en fragmentación en Demoblast.

	P80 ["]	%<1" ["]	Incremento/Disminución Beneficio P80 [%]	Incremento/Disminución Beneficio %<1" [%]
Caso Base	8,74	15	-	-
1° Demoblast	4,5	28	94	87
3° Demoblast	4,5	17	94	13
4° Demoblast	3,03	28	188	87

La carga explosiva de 0,5 [m] (35 [kg]) en la zona del taco distribuye mejor la energía a lo largo del pozo. Esto contribuye en la disminución del volumen o tamaño resultante los bloques preformados y condición estructural presente.

Para la densidad de colpa se tiene que se alcanza para la primera “*Demoblast*” 1,13 +/- 0,03 [g/cm³], además la VOD promedio es de 5.919 [m/s]. Ambos valores están en rangos ideales del producto.

Del análisis técnico económico se tienen los siguientes porcentajes de incremento o disminución en los beneficios para las “*Demoblast*”:

Tabla 68. Incremento/disminución beneficio en factor de carga total en *Demoblast*.

	Factor de Carga [g/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	435	-
1° Demoblast	736	69
3° Demoblast	515	19
4° Demoblast	442	2

Todas las “*Demoblast*” presentan un incremento en el factor de carga total, pero el mayor aumento se logra en la primera “*Demoblast*” con un 69% con respecto al factor de carga esto se debe a que presenta menor tonelaje a remover (979 [ton]) debido a la malla de menor dimensión (5x5).

Tabla 69. Incremento/disminución beneficio en energía efectiva total por tonelada en *Demoblast*.

	Energía Efectiva Total por tonelada [MJ/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	1,25	-
1° Demoblast	2,37	90
3° Demoblast	1,64	31
4° Demoblast	1,41	13

Se presenta un incremento en el beneficio en lo que respecta a energía efectiva total por tonelada en todas las “*Demoblast*”, lo que demuestra que el explosivo Vistis 225 resulta ser de mayor energía que el Fortis Extra 65. La primera “*Demoblast*” presenta mayor incremento en energía efectiva total por tonelada, esto se debe principalmente a que posee una malla de menor dimensión (5x5), aumentando la interacción entre los pozos y mayor liberación de energía.

Tabla 70. Incremento/disminución beneficio en costo perforación por tonelada en Demoblast.

	Costo perforación por Tonelada [USD/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,117	-
1° Demoblast	0,196	-68
3° Demoblast	0,136	-17
4° Demoblast	0,117	0

En el costo de perforación por tonelada se presenta una disminución en el beneficio en todas las “Demoblast”, pero las que presentan mayor disminución del beneficio es la primera “Demoblast”, esto es porque presentan una malla de menor dimensión (5x5), lo que provoca mayor gasto en perforación al realizarse mayor cantidad de pozos para un mismo tamaño.

Tabla 71. Incremento/disminución beneficio en precio por tonelada (Tronadura) en Demoblast.

	Precio por tonelada (Tronadura)	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,385	-
1° Demoblast	1,004	-160
3° Demoblast	0,679	-76
4° Demoblast	0,602	-56

Se observa una disminución en el beneficio en todas las “Demoblast”, esto en primera instancia se debe a que se utilizó el explosivo Vistis 225/Vistan 225, el cual posee mayor precio que el Fortis Extra 65 utilizado en el caso base. Luego, se tiene que la disminución de un 160% en la primera “Demoblast” es consecuencia de que posee poco tonelaje a remover debido a la pequeña dimensión de la malla (5x5) y por ende mayor cantidad de pozos cargados.

Tabla 72. Incremento/disminución beneficio en costo final por tronadura (PyT) en Demoblast.

	Costo Final Por Tronadura (PyT) [USD/ton]	Incremento/Disminución Beneficio [%]
Caso Base	0,502	-
1° Demoblast	1,200	-139
3° Demoblast	0,815	-62
4° Demoblast	0,719	-43

Se tiene finalmente para el costo final por proceso de perforación y tronadura que la primera “Demoblast” resultó ser más costosa, debido principalmente al precio más elevado del explosivo Vistis 225 y malla de menor dimensión (5x5) que en consecuencia resulta en menor tonelaje a remover (979 [ton]).

4.8 Análisis rendimiento chancador

4.8.1 Análisis chancador caso histórico

Se tiene que hay un 8% de aumento en el beneficio con respecto al tonelaje que llega al chancador comparando el tercer cuartil con el primero, esto se debe posiblemente a que debido a factores externos a la minera, se tomó la decisión de una reducción de un 50% en la producción, lo que se traduce en un 50% menos de personal, lo que provoca mayor eficiencia en el proceso debido a que es más fácil coordinar menos trabajadores, sin embargo, esta no es solamente la posible causa, ya que el modo de operar sigue siendo el mismo, por lo tanto esto se atribuye a las nuevas prácticas del nuevo explosivo de alta energía, con el que se disminuyeron las cargas redireccionadas por fragmentación gruesa por ejemplo, y genera aumento en el tonelaje. Además se logra un reducción del 2% en cuanto a la potencia consumida comparando los cuartiles, esto es atribuible netamente a la mejora en la fragmentación debido al uso del nuevo explosivo de alta energía, lo cual provoca que el chancador no sea sobre exigido para reducir sobre tamaños.

Tabla 73. Incremento/disminución de beneficio en tonelaje pasante a chancador y potencia caso histórico.

Cuartil	Tonelaje/h	Potencia [kW/h]	[%] Beneficio tonelaje pasante de cobre	[%] Beneficio potencia
E-F-M	5.527	279	-	-
J-A-S	5.955	274	8	2

El 2% de beneficio en potencia se traduce en un 5% de aumento de costos energéticos asociados al chancador, esto se debe principalmente al aumento en la eficiencia del chancador en el caso del tercer cuartil provocando que se encuentre disponible y utilizado más tiempo en el mes, aumentando el costo energético.

Tabla 74. Incremento de beneficio en costo energético caso histórico.

Cuartil	Costo Potencia [USD]	[%] Aumento costo energético
E-F-M	51.809	-
J-A-S	54.411	-5

Luego, se tienen los beneficios aportados por el tonelaje pasante en el chancador, para el cual es esperado el aumento de un 15% en el tonelaje debido a que influye la ley del cuartil, sin embargo, como se consideró una ley promedio para ambos cuartiles se obtiene el mismo beneficio asociado a los dólares aportados por el tonelaje de cobre pasante, por lo tanto se asocia el beneficio obtenido al nuevo explosivo de alta energía.

Tabla 75. Disminución de beneficio por tonelaje pasante de cobre caso histórico.

Cuartil	USD aportados por tonelaje pasante de cobre	[%] Beneficio tonelaje pasante de cobre
E-F-M	141.260.410	-
J-A-S	162.540.237	15

4.8.2 Análisis chancador caso específico

Se tiene para las distintas tronaduras, que la 4° Demoblast abarca mayor tonelaje por hora como también la mayor potencia requerida por el chancador, el aumento de potencia puede ser causado por el mismo aumento de tonelaje donde el chancador pudo ser atochado de material por ende provocando mayor exigencia de este.

La menor potencia se logra en la 1° Demoblast que a su vez posee el menor tonelaje por hora, explicándose de la misma manera que para la 4° Demoblast.

Tabla 76. Incremento/disminución de beneficio en tonelaje pasante a chancador y potencia caso específico.

Tronadura	Tonelaje/h	Potencia [kW/h]	[%] Beneficio tonelaje pasante de cobre	[%] Beneficio potencia
Caso Base	6.965	312	-	-
1° Demoblast (Vistis 225)	5.764	276	-17	12
3° Demoblast (Vistan 225)	6.460	325	-7	-4
4° Demoblast (Vistis 225)	7.034	359	1	-15

El aumento de tonelaje puede ser atribuido a 2 posibles razones:

- Temas netamente operativos, donde la experiencia del operador de la pala es influyente en el tonelaje obtenido.
- Distribución por parte del sistema Dispatch de los camiones, los cuales podrían no haber sido tan seguidos en la descarga en el chancador.

En cuanto a la diferencia en potencia, además de considerar la diferencia en el tonelaje que obliga a sobre exigir al chancador, también se atribuye a un tema granulométrico, donde la disminución en el P80 generó grandes ahorros energéticos en el chancador y en consecuencia, adjudicado al

cambio del explosivo que logró mayor fragmentación en la roca, ya que las formas de carguío y diseño de la tronadura para el caso base y la 4° “Demoblast” eran idénticas.

El 12% de beneficio en potencia para la 1° “Demoblast” se traduce en un 12% de disminución de costos energéticos asociados al chancador, esto se debe principalmente a que posee una de las menores eficiencias del chancador en comparación a las demás tronaduras, provocando que se encuentre disponible y utilizado menor tiempo en el día, disminuyendo el costo energético.

Tabla 77. Incremento de beneficio en costo energético caso específico.

Tronadura	Costo Potencia [USD]	[%] Beneficio Potencia
Caso Base	775	-
1° Demoblast (Vistis 225)	684	12
3° Demoblast (Vistan 225)	817	-5
4° Demoblast (Vistis 225)	949	-22

Luego, se tienen los beneficios aportados por el tonelaje pasante de cobre en el chancador, para el cual es esperado el aumento de un 7% en los dólares para el caso de la 4° “Demoblast” debido a que posee el mayor tonelaje por hora, además de una alta eficiencia del chancador en comparación a las demás “Demoblast”.

Tabla 78. Incremento/disminución de beneficio por tonelaje pasante de cobre caso específico.

Tronadura	USD aportados por Tonelaje pasante de cobre	[%] Beneficio tonelaje pasante de cobre
Caso Base	2.548.385	-
1° Demoblast	2.106.750	-17
3° Demoblast (Vistan 225)	2.389.851	-6
4° Demoblast (Vistis 225)	2.736.732	7

4.9 Análisis pérdidas cargas redireccionadas por fragmentación gruesa

4.9.1 Análisis pérdidas cargas redireccionadas caso histórico

En cuanto a las cargas redireccionadas para cada cuartil, se tiene que se reducen en un 88% y el total de las cargas aumenta en un 15%, esto implica que proporcionalmente se redujeron las cargas

redireccionadas para el tercer cuartil, dentro de las causas de esto, se encuentra la efectividad del explosivo de alta energía, logrando reducir la granulometría y por lo tanto pérdidas de material por el mismo motivo, traduciéndose en un 88% de reducción de pérdidas en cuanto a dólares aportados por el cobre en el material.

Tabla 79. Incremento/disminución de beneficio en cargas redireccionadas caso histórico.

Cuartil	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Aumento de beneficio CRD [%]	Aumento de beneficio Carga [%]
E-F-M	377.278	19.505.200	-	-
J-A-S	43.802	16.546.024	-88	-15

Tabla 80. Incremento/disminución de beneficio en costos por cargas redireccionadas caso histórico.

Cuartil	USD de cobre CRD	Aumento de beneficio [%]
E-F-M	4.613.596	-
J-A-S	535.639	88

4.9.2 Análisis pérdidas cargas redireccionadas caso específico

Para las cargas redireccionadas para cada tronadura realizada en terreno se tiene que la 4° “Demoblast” alcanza los mayores beneficios, ya que no presenta cargas redireccionadas y además logra un aumento en el total de cargas, esto se atribuye netamente al uso del nuevo explosivo de alta energía, que como se tiene en resultados de granulometría, presenta el P80 más bajo, lo que genera que no existan problemas de sobre tamaño.

Tabla 81. Incremento/disminución de beneficio en cargas redireccionadas caso específico.

Tronadura	Total CRD [Ton]	Total Cargas [Ton]	Aumento de beneficio CRD [%]	Aumento de beneficio Carga [%]
Caso Base	484	253.132	-	-
1° Demoblast	2.178	234.132	-350	-8
3° Demoblast	-	247.566	100	-2
4° Demoblast	-	274.670	100	9

Por lo tanto en cuanto a dólares perdidos por cargas redireccionadas se tiene que se logra un 100% de aumento en beneficio para la 3° y 4° “Demoblast” debido a que no poseen cargas redireccionadas asociadas a estas tronaduras.

Tabla 82. Incremento/disminución de beneficio en costos por cargas redireccionadas caso específico.

Tronadura	USD de cobre CRD	Aumento de beneficio [%]
Caso Base	6.454	-
1° Demoblast	29.045	-350
3° Demoblast	-	100
4° Demoblast	-	100

4.10 Análisis Flujo de caja

4.10.1 Análisis Flujo de caja caso histórico

Se tiene para el flujo de caja total, considerando el tonelaje pasante para el caso histórico que se genera un aumento del beneficio de un 20% comparando el primer cuartil con el tercer cuartil, lo que indica a niveles generales (propósito del análisis histórico) que el uso del explosivo de alta energía es la causa del aumento en el beneficio ya que entre los 2 cuartiles es la única diferencia que se ha utilizado en el nivel de gestión y utilización de recursos en cuanto a las actividades analizadas, además de considerar todos los parámetros y análisis previo hecho por cada actividad.

Tabla 83. Incremento en beneficio flujo de caja caso histórico.

	E-F-M (1Q)	J-A-S (3 Q)
Flujo de caja total [USD]	130.966.071	156.599.000
Beneficio Total [%]	-	20

Ahora bien, considerando solo los costos asociados, dejando de lado el tonelaje pasante de cobre que llega a chancador, se tiene lo siguiente:

Tabla 84. Incremento en beneficio flujo de caja costos caso histórico.

	E-F-M (1Q)	J-A-S (3 Q)
Flujo de caja de costos [USD]	-10.294.339	-5.941.237
Beneficio Costos [%]	-	42

Donde se observa una reducción del 42% en los costos del tercer cuartil, donde claramente se tiene una reducción considerable, donde el factor más preponderante en cuanto a la reducción son las cargas redireccionadas, esto se asocia principalmente al uso de los nuevos explosivo de alta energía, debido a que a pesar de que los costos de perforación y tronadura son altos, no existe una diferencia tan notable, esto es consecuencia de la existencia de menor granulometría en las tronaduras del

tercer cuartil, por ende se logra reducir las cargas redireccionadas debido a granulometría gruesa y de sobre tamaño.

4.10.2 Análisis flujo de caja caso específico

En el caso específico donde se tiene para cada “Demoblast” en comparación al caso base, se tiene el siguiente resultado:

Tabla 85. Incremento en beneficio flujo de caja caso específico.

	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Flujo de caja total [USD]	2.540.330	2.075.846	2.387.886	2.734.601
Beneficio Total [%]	-	-18	-6	8

Donde se tiene que la 4° “Demoblast” alcanza un 8% de incremento en beneficio, esto se debe principalmente a que posee mayor beneficio debido al aumento de tonelaje pasante de cobre que llega al chancador, donde se puede asociar a temas netamente operacionales (sistema de distribución de carga por parte de Dispatch) y no necesariamente al uso del nuevo explosivo de alta energía.

Luego, analizando para el caso de flujo de caja pero para los costos, se tiene:

Tabla 86. Incremento en beneficio flujo de caja costos caso específico.

	Caso Base	1° Demoblast	3° Demoblast	4° Demoblast
Flujo de caja de costos [USD]	-8.056	-30.904	-1.965	-2.131
Beneficio Costos [%]	-	-284	76	74

Donde se observa que la 3° “Demoblast” posee el más alto de beneficio de costos, ya que se reduce el costo en un 76%, sin embargo, es muy similar a la 4° “Demoblast”, ya que poseen costos energéticos y de perforación y tronadura bastantes similares, debido a que fueron utilizados los mismos explosivos (Vistis 225) y las mallas son similares, 6x6 para la 3° “Demoblast” y 6x7 para la 4° “Demoblast”. Se tiene que para la 1° “Demoblast” los costos aumentan considerablemente, esto es debido a las cargas redireccionadas asociadas a esa tronadura, lo que conlleva a decir que la 1° “Demoblast” no fue satisfactoria en cuanto a la granulometría obtenida.

Capítulo 5: Conclusiones

Se tiene que claramente el explosivo Vistis 225 es de más energía en comparación al resto de explosivos e inclusive que el Fortis Extra 65, por lo tanto, radica en una mayor fragmentación de la roca por medio del fracturamiento debido a mayor energía liberada, ayudando a resolver los constantes problemas de material de gran tamaño resultantes en la fase 13 y 14 debido a la existencia de roca altamente competente.

El P80 en las “*Demoblast*” resultó ser de un 100% de beneficio aproximadamente, lo cual refuerza el estudio de la rentabilidad que trae consigo el uso de este explosivo de alta energía. Además, las pruebas realizadas en terreno superaron con creces las propuestas simuladas en cuanto a beneficio de fragmentación. Esto se atribuye a lo conservador y pesimista en los datos ingresados en el software utilizado, con el fin de darle mayor veracidad. También se tiene que el software no aplica eventos operacionales como es el caso del efecto del confinamiento (donde un taco adecuado genera una buena propagación de la energía a través del macizo provocando el fracturamiento) producido por el taco, donde un corto taco puede generar la eyección de este, solo considera que mayor cantidad de explosivo genera mayor fracturamiento. Sin embargo, ambos tipos de pruebas (simuladas y en terreno) arrojaron beneficios considerables en fragmentación, lo que lleva a concluir que la aplicación del explosivo Vistis 225 en los sectores de alta dureza es totalmente confiable y exitosa.

Ahora bien, comentando los costos asociados a la variación en el explosivo, se observa que económicamente son rentables tanto como las “*Demoblast*” y las propuestas, a pesar de que existe el factor de un explosivo que alcanza mayor precio en el mercado generando altos costos principalmente en tronadura. Estos costos son los que presentan gran diferencia entre las pruebas en comparación a los demás, sin embargo, el tema aún más relevante son las cargas redireccionadas, que influyeron de manera significativa en el flujo de caja generando la rentabilidad buscada.

Claramente existe un beneficio en el caso histórico, donde el tercer cuartil del año 2015 supera con creces al primer cuartil, confirmando que el uso del nuevo explosivo de alta energía trajo beneficios considerables e incluso a pesar de no realizar todas las tronaduras con el explosivo de alta energía en el tercer cuartil, aun así se logra un cambio beneficioso.

Para el caso de las propuestas se observa que la configuración resultante con más oportunidad de ser aplicada por poseer la mayor cantidad de beneficios es la propuesta 1, ya que a pesar de no ser la propuesta con mayor beneficio en P80, alcanza un valor bastante elevado y aceptable, además en cuanto al porcentaje pasante menor a 1 pulgada no alcanza el mayor porcentaje en comparación a las demás propuestas, pero esto no es necesariamente un problema, todo lo contrario, un beneficio, ya que si existiera un gran presencia de finos puede afectar el proceso aguas abajo (Complicación en la pila de lixiviación por ejemplo disminuyendo la recuperación). También se

tiene que alcanza incrementos tanto en energía del explosivo como en factor de carga total, aunque en este último solo de un 1%; en los costos de perforación no aumentan a diferencia de las demás propuestas y mantiene el menor costo de tronadura, lo que se traduce en un menor costo del proceso completo de Perforación y Tronadura, manteniendo la misma dimensión de la malla pero alcanzando mayores beneficios en fragmentación. Por lo que la configuración recomendada para ser aplicada en la faena sería la propuesta 1.

Con respecto a las pruebas en terreno “*Demoblast*”, se concluye que la configuración de la cuarta “*Demoblast*” es la más factible de ser aplicada, esto se debe a que al igual que la propuesta 1, alcanza los menores costos en el proceso de Perforación y Tronadura y prácticamente nulos en perforación, además conlleva a un excelente desempeño en cuanto a fragmentación, teniendo un gran incremento en el beneficio del P80 y similar a la propuesta 1, presenta un incremento aceptable en lo que respecta a porcentaje pasante menor a 1 pulgada con el objetivo de no afectar procesos posteriores de recuperación.

En cuanto a factor de carga y energía presenta incrementos mínimos pero que dado los exitosos resultados son dispensables. Por lo que la cuarta “*Demoblast*” resulta ser eficiente y aplicable para los sectores de roca altamente competente, y así lograr rentabilidad con buenos resultados. En cuanto al flujo de caja de costos, aunque no se logra la mayor reducción (79% en comparación a 80% de la 3° “*Demoblast*”), la diferencia es mínima y además como se menciona, posee mayores beneficios en cuanto a fragmentación, logrando también beneficio y rentabilidad por esta parte.

Por lo tanto, se logra alcanzar un óptimo para una malla de 6x7 utilizando el explosivo Vistis 225 con carga en el taco, logrando reducir el P80 aproximadamente a la mitad, mejorando radicalmente el proceso al equiparar con mallas de la misma dimensión pero utilizando el explosivo Fortis Extra 65. El no cambiar el diseño de la malla ayuda a generar simpleza en el cambio, además al existir mallas más grandes y no variar, se logra utilizar menor cantidad de explosivo al reducir la cantidad de pozos, que esto a su vez genera mayor disponibilidad en las perforadoras (con disponibilidad se hace referencia a lo disponible que se encontrará la perforadora para realizar otras tareas), ya que si fuera el caso de existir reducción de malla la perforadora necesitaría mayor tiempo para realizar más pozos, alargándose el proceso de tronadura y dificultando la operación causando problemas a la hora de cumplir metas, tanto de tonelaje como de plazos. Por lo que la utilización de explosivos de alta energía contribuye en gran manera a mejorar el rendimiento de la fragmentación y hacer rentable el negocio desde una visión global.

En cuanto al chancador, solo es atribuible el cambio de explosivo a la mejora en términos energéticos, logrando disminuir el consumo energético debido a la menor granulometría al utilizar explosivos de alta energía en comparación con el actuar habitual de la minera.

Estas medidas incrementan la rentabilidad del proceso global de minería, ya que se traducen en beneficios posteriores a la tronadura en sí, logrando cumplir con los objetivos impuestos en un comienzo.

Se tiene que el análisis y toma de datos en el proceso de Perforación y Tronadura es muy complejo, siendo la base de todos los resultados la manera en que se obtienen los datos para conformar la base de la información, por lo que los procedimientos para conseguir los datos de diseño deben ser seguidos adecuada y prolijamente, una mala toma de datos se traduce en un fracaso en el análisis técnico económico realizado.

Capítulo 6: Bibliografía

- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [1]* (págs. 15 - 23, Capítulo 1). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [6]* (págs. 441 - 452, Capítulo 32). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [5]* (págs. 139 - 147, Capítulo 10). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [4]* (págs. 149 - 164, Capítulo 11). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [2]* (págs. 25 - 56, Capítulo 2). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- (2003). En C. L. Jimeno, *Manual de perforación y voladura de rocas [3]* (págs. 73 - 90, Capítulo 4). Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España.
- Freeport McMoran Copper & Gold - Minera El Abra.* (2014). Obtenido de http://www.fcx.com/operations/Chile_ElAbra.htm
- Orica Mining Services [1]. (2015). *Protocolo de pruebas Vistan Vistis SCM El Abra marzo 2015.*
- Orica Mining Services [2]. (2015). *i-kon Basic Operations* . Obtenido de http://www.oricaminingsservices.com/bo/es/page/products_and_services/electronic_blasting_systems/i-kon/i-kon_basic_operations
- Orica Mining Services [3]. (2009). *Technical Data Sheet - i-kon SURBS.*
- Orica Mining Services [4]. (2009). *Technical Data Sheet - i-kon Digital Energy Control System.* Obtenido de http://www.oricaminingsservices.com/au/en/product/products_and_services/electronic_blasting_systems/i-kon/i-kon_logger/284

- Orica Mining Services [5]. (2013). *Technical Data Sheet - Pentex*. Obtenido de http://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/initiating_systems/pentex_co_-_450/774
- Orica Mining Services [6]. (2012). *Technical Data Sheet - Sistema Fortan Advantage*. Obtenido de http://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/bulk_systems/page_bulk_systems/fortan_advantage/880
- Orica Mining Services [7]. (2010). *Technical Data Sheet - Sistema Fortan Extra*. Obtenido de http://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/bulk_systems/page_bulk_systems/fortan_extra/47
- Orica Mining Services [8]. (2012). *Technical Data Sheet - Sistema Fortis Extra*. Obtenido de http://www.oricaminingservices.com/cl/es/product/products_and_services/bulk_systems/page_bulk_systems/fortis_extra/901
- Orica Mining Services [9]. (2012). *Technical Data Sheet - Sistema Fortis Advantage*. Obtenido de http://www.oricaminingservices.com/bg/en/product/products_and_services/bulk_systems/page_bulk_systems/fortis_advantage_80/1242
- P., M. (2010). Presentación Capítulo PMI Islas Baleares. *Profesionalizando la Dirección de Proyectos* (págs. 18-30). España: Avanza.

