

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE BLASTSCHEME A LA
OPERACIÓN UNITARIA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN
CANTERAS**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Anjoul R., Vanessa M.
Utches V., Carlos G.
Para optar al Título de
Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE BLASTSCHEME A LA
OPERACIÓN UNITARIA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN
CANTERAS**

TUTORA ACADÉMICA: Prof. Sasha E. Cazal D.
COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Juan C. Arteaga L.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Anjoul R., Vanessa M.
Utches V., Carlos G.
Para optar al Título de
Ingeniero de Minas

Caracas, noviembre 2016

ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE BLASTSCHEME A LA OPERACIÓN UNITARIA DE PERFORACIÓN Y VOLADURA EN CANTERAS

AUTORES: VANESSA MERCEDES ANJOUL* Y CARLOS GABRIEL UTCHES*
TUTORA ACADÉMICA: SASHA E. CAZAL D.*
COTUTOR ACADÉMICO: JUAN C. ARTEAGA L.**

* Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas 1020A, Venezuela.

** Departamento de Investigación de Operaciones y Computación. Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas 1020A, Venezuela.

Palabras clave: canteras, perforación, voladura, coeficiente de uniformidad, tamaño medio de fragmentación, BlastScheme.

RESUMEN

Actualmente en la operación unitaria de perforación y voladura en cantera a nivel mundial, se ha comenzado a implementar *software* especializado en minería para optimizar los resultados de la voladura. En este contexto, la presente investigación planteó como objetivo general adaptar el *software* BlastScheme a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras. La adaptación cuenta con funciones que toman en consideración condiciones geológicas y operativas del sujeto de estudio, que anteriormente no estaban contempladas. La investigación es de tipo proyectiva y el diseño de fuente mixta transeccional contemporánea. Para ello, se plantearon 5 fases de la investigación. Las dos primeras fases concernientes a la formulación y aplicación un instrumento que recolectara información en campo. En la tercera fase se plantearon los algoritmos que procesaran los datos teóricos y reales para el modelamiento, proyección y control de voladura; la cuarta fase se basó en el diseño de una interfaz que integrara los algoritmos y la data recopilada en un espacio “amigable”, y la quinta fase constó en verificar el *software* por medio de la comparación de los datos teóricos y reales para confirmar su validez. Basado en lo anteriormente expuesto, se obtuvo como resultado que la adaptación del *software* es capaz de proyectar el resultado de las voladuras, sin embargo, por la escala del error que presentó el coeficiente de uniformidad, se creó una función que genera un factor de corrección para este parámetro, a modo de asegurar la confiabilidad del programa en el tiempo. Se concluye que el *software* presenta mayor confiabilidad cuando opera en canteras con admisión máxima de triturador primario mayor a 1m, y que, por sus numerosas funciones, es una herramienta tecnológica que permite el modelamiento, proyección y control de la operación unitaria de perforación y voladura.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

En primer lugar, a Dios por darme la oportunidad de vivir esta experiencia.

A la Universidad Central de Venezuela, por ser un segundo hogar y enseñarme todo lo que no se aprende en casa.

A nuestros tutores académicos, Sasha Cazal y Juan Arteaga, por su guía durante todo el trabajo.

A los profesores José Luis Contreras, José Luis De Abreu, Katherine Silva, Luis Araya, Miguel Castillejo, María Itriago y Ricardo Vargas, por su colaboración y apoyo tanto en este trabajo como en la carrera.

A mi madre Elsa Rodríguez, por su amor incondicional.

A mi hermanita Vivianne y mi hermana de la vida Annabella Vidal, por todo.

Finalmente, a Daniel Salvador Mejías con quien las palabras no alcanzan.

Vanessa Anjoul

El desarrollo de este trabajo de grado lo dedico principalmente a Dios por darme la salud y fortaleza en todo momento. A mi Madre y mi Padre por su cariño y orientaciones oportunas. Al Departamento de Minas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela por el apoyo brindado. Un agradecimiento especial, a los profesores José De Abreu, José Contreras y Katherine Silva, por su colaboración y ayuda; y por último a los tutores Sasha Cazal y Juan. Arteaga

Carlos Utches

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	XV
I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN	XVII
I.1- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
I.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	XVIII
<i>I.2.1 Objetivo general</i>	<i>xviii</i>
<i>I.2.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>xviii</i>
I.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	XVIII
1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	1
1.1 ANTECEDENTES NACIONALES DE INVESTIGACIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES INTERNACIONALES DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3 SUJETO DE ESTUDIO DE LA INVESTIGACIÓN	4
<i>1.3.1 Localización geográfica de las canteras</i>	<i>4</i>
<i>1.3.2 Características geológicas de las canteras</i>	<i>6</i>
1.3.2.1 Formación Caratas	6
1.3.2.2 Provincia Geológica de Imataca.....	6
1.3.2.3 Las Brisas.....	7
1.4 DEFINICIONES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
<i>1.4.1 Investigación de operaciones.....</i>	<i>8</i>
1.4.1.1 Fases del estudio de Investigación de Operaciones.....	8
1.4.1.2 Componentes de un problema de optimización	9
1.4.1.3 Programación no lineal	9
<i>1.4.2 Modelos utilizados en la investigación.....</i>	<i>10</i>
1.4.2.1 Modelos matemáticos para la distribución de tamaños post-voladura. 10	
1.4.2.2 Modelos estadísticos para el cálculo de distribución de frecuencias en variables cuantitativas continuas.....	16
<i>1.4.3 Teorías del diseño de voladuras a cielo abierto.....</i>	<i>19</i>
1.4.3.1 Cálculo de retiro para voladuras en banco	19
1.4.3.2 Cálculo del espaciamiento para voladuras en banco	22
1.4.3.3 Cálculo del taco para voladuras en banco	23
1.4.3.4 Cálculo de sobre perforación para voladuras en banco.....	24
1.4.3.5 Cálculos de distribución de carga explosiva para voladuras en banco. 25	

1.4.4	<i>Buenas prácticas en la evaluación del resultado de las voladuras</i>	26
1.4.4.1	Fragmentación y esponjamiento de la pila de escombros	26
1.4.4.2	Esquema de optimización económica de la perforación y voladura	29
1.4.5	<i>Términos fundamentales para la investigación</i>	30
1.4.5.1	Explosivos	30
1.4.5.2	Propiedades de los explosivos.....	30
1.4.5.3	Variables controlables de una voladura	31
1.4.5.4	Variables no controlables de una voladura	33
1.4.6	<i>Programas para el desarrollo de la investigación</i>	34
1.4.6.1	Software libre de edición fotográfica Inkscape.....	34
1.4.6.2	Software libre de análisis granulométrico ImageJ	34
1.4.6.3	Programa de compilación (Lazarus)	35
1.4.6.4	Definiciones Adicionales	35
2	CAPÍTULO II: MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	37
2.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	37
2.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	37
2.3	SELECCIÓN DE LOS SUJETOS DE ESTUDIO.....	37
2.4	TÉCNICA E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	38
2.4.1	<i>Guía de observación</i>	38
2.5	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS	39
2.6	FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	39
2.6.1	<i>Diagrama de flujo de la investigación</i>	39
2.6.2	<i>Descripción de las Fases de la investigación</i>	42
2.6.2.1	Fase 1: Formulación de los instrumentos.....	42
2.6.3	<i>Fase 2: Aplicación de la guía de observación en campo</i>	43
2.6.4	<i>Fase 3: Planteamiento de los algoritmos</i>	46
2.6.5	<i>Fase 4: Diseño de la interface</i>	46
2.6.6	<i>Fase 5: Verificación de los resultados obtenidos mediante el software</i>	47
2.6.6.1	Validación del ImageJ en el laboratorio.....	47
3	CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
3.1	ANÁLISIS DE BASES TEÓRICAS	49
3.1.1	<i>Codificación de las variables</i>	49

3.1.2	<i>Comparación de las teorías</i>	50
3.1.3	<i>Criterio para la discriminación de las variables</i>	55
3.1.4	<i>Análisis de las variables controlables de la voladura</i>	55
3.1.4.1	Iteración del diámetro	56
3.1.4.2	Iteración de variables originales respecto al diámetro	57
3.1.5	<i>Análisis de los postulados de tamaño medio de fragmentación</i>	60
3.1.5.1	Análisis de variables de Kuznetsov.....	61
3.1.5.2	Análisis de variables de Larson y SveDeFo.....	63
3.1.5.3	Análisis de variables de Chung y Katsabanis.....	66
3.1.6	<i>Comparación de los postulados de tamaño medio de roca (k50)</i>	67
3.1.6.1	Factor de carga	67
3.1.6.2	Altura	69
3.1.6.3	Retiro.....	70
3.1.6.4	Carga total.....	71
3.1.7	<i>Análisis de Weibull</i>	72
3.1.8	<i>Análisis del índice de uniformidad (n)</i>	73
3.2	FORMULACIÓN DE LA GUÍA DE OBSERVACIÓN	74
3.2.1	<i>Guía de Observación para día de Voladura</i>	74
3.2.1.1	Instrucciones para el llenado de la guía:	77
3.2.2	<i>Guía de Observación para Control de Resultados de las Voladuras</i>	78
3.2.2.1	Instrucciones para el llenado de la guía	79
3.3	APLICACIÓN DE LAS GUÍAS DE OBSERVACIÓN	79
3.3.1	<i>Descripción de los frentes de voladura</i>	79
3.3.1.1	FV cantera Constructora Pedeca C.A. Clarines	79
3.3.1.2	FV cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar.....	81
3.3.1.3	FV en la Cantera Cantaca C.A.	83
3.3.2	<i>Guía de Observación para día de Voladura</i>	84
3.3.3	<i>Análisis visual posterior a la voladura</i>	92
3.3.3.1	Cantera Clarines	92
3.3.3.2	Cantera Bolívar Frente 1	93
3.3.3.3	Cantera Bolívar Frente 2	95
3.3.3.4	Cantera Cantaca	96
3.3.4	<i>Llenado de las Guías de Observación para el Control de Voladuras</i>	97

3.3.5	<i>Análisis fotográfico posterior a las voladuras.....</i>	99
3.4	PLANTEAMIENTO DE LOS ALGORITMOS	106
3.4.1	<i>Algoritmo para calcular un esquema de voladura según un autor seleccionado.....</i>	106
3.4.2	<i>Algoritmo para calcular una distribución granulométrica</i>	107
3.4.3	<i>Algoritmo del cálculo de un esquema de voladura en función del menor factor de carga que cumpla con un k50 cercano al deseado por el usuario.....</i>	108
3.4.4	<i>Algoritmo del cálculo de un esquema de voladura en función del mayor coeficiente de uniformidad que cumpla con un k50 cercano al deseado por el usuario 110</i>	
3.4.5	<i>Algoritmo del funcionamiento del BlastScheme</i>	112
3.4.6	<i>Algoritmo del cálculo de confiabilidad del BlastScheme</i>	112
3.4.7	<i>Algoritmo de una distribución granulométrica parcial de un archivo fotográfico editado.....</i>	113
3.5	DISEÑO DE LA INTERFAZ DE LA ADAPTACIÓN DEL SOFTWARE BLASTSCHEME 114	
3.5.1	<i>Ventana: Menú Principal.....</i>	114
3.5.2	<i>Ventana: Creación.....</i>	115
3.5.3	<i>Ventana: Registro</i>	118
3.5.4	<i>Ventana: Control</i>	119
3.5.5	<i>Ventana: Monitoreo.....</i>	121
3.5.6	<i>Ventana: Ayuda.....</i>	122
3.5.7	<i>Análisis del diseño de la adaptación de la interfaz</i>	123
3.6	CONFIABILIDAD DEL SOFTWARE BLASTSCHEME	123
3.6.1	<i>Validación del ImageJ</i>	123
3.6.1.1	<i>Captación y procesamiento de las imágenes</i>	124
3.6.1.2	<i>Gráficas de distribución de frecuencias</i>	126
3.6.1.3	<i>Análisis granulométrico de las muestras.....</i>	130
3.6.1.4	<i>Comparación final de las muestras.....</i>	134
3.6.2	<i>Verificación del software BlastScheme.....</i>	136
3.6.2.1	<i>Cantera Clarines</i>	136
3.6.2.2	<i>Cantera Cantaca</i>	137
3.6.2.3	<i>Cantera Bolívar 1</i>	138

3.6.2.4	Cantera Bolívar 2	140
3.6.3	<i>Análisis de la validación del BlastScheme</i>	141
CONCLUSIONES	144
EN RELACIÓN AL ANÁLISIS DE LAS BASES TEÓRICAS Y ELABORACIÓN DE LA GUÍA DE OBSERVACIÓN		144
EN RELACIÓN A LA APLICABILIDAD DEL SOFTWARE		146
EN RELACIÓN A LA VALIDACIÓN DEL SOFTWARE BLASTSCHEME		147
CONCLUSIONES GENERALES		147
RECOMENDACIONES	150
BIBLIOGRAFÍA	151
ANEXOS	154
ANEXO 1: INTERFAZ DEL SOFTWARE DE DISEÑO DE VOLADURA BLASTSCHEME VERSIÓN 1.0		155
ANEXO 2: INSTRUMENTO DE VALIDACIÓN DE LA GUÍA DE OBSERVACIÓN.....		159

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: FACTOR DE ROCA.....	11
TABLA 2: MATRIZ DE COMPARACIÓN DE FÓRMULAS DE CÁLCULO DE RETIRO	19
TABLA 3: PRESENTACIONES DE EMULSIÓN ORICA VENEZUELA.....	36
TABLA 4: CODIFICACIÓN DE LAS VARIABLES	50
TABLA 5: TEORÍAS DE DISEÑO DE RETIRO	51
TABLA 6: TEORÍAS DE DISEÑO DE ESPACIAMIENTO, TACO Y SOBREPUNTA.....	52
.....	52
TABLA 7: TEORÍAS PARA EL CÁLCULO DE CARGA EXPLOSIVA	53
TABLA 8: TEORÍAS SOBRE MODELOS DE FRAGMENTACIÓN	54
TABLA 9: PARÁMETROS INICIALES DE LA ITERACIÓN DEL DIÁMETRO	56
TABLA 10: PARÁMETROS INICIALES DE LA ITERACIÓN.....	58
TABLA 11: VARIABLES INICIALES PARA EL ANÁLISIS DE KUZNETSOV	61
TABLA 12: DATOS INICIALES	63
TABLA 13: DATOS INICIALES DE LAS VARIABLES DE CHUNG Y KATSABANIS.....	66
TABLA 14: GUÍA DE OBSERVACIÓN DÍA DE VOLADURA.....	76
TABLA 15: GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA EL CONTROL DE VOLADURAS	78
TABLA 16: GUÍA DE OBSERVACIÓN DÍA DE VOLADURA CANTERA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. CLARINES.....	84
TABLA 17: GUÍA DE OBSERVACIÓN DÍA DE VOLADURA CANTERA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. BOLÍVAR FRENTE 1	86
TABLA 18: GUÍA DE OBSERVACIÓN DÍA DE VOLADURA CANTERA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. BOLÍVAR FRENTE 2	88
LUGAR DE LA VOLADURA: CANTERA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. BOLÍVAR FRENTE 2.....	88
TABLA 19: GUÍA DE OBSERVACIÓN DÍA DE VOLADURA CANTERA CANTACA.....	90
TABLA 20: GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA EL CONTROL CANTERA CLARINES	97
TABLA 21: GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA EL CONTROL CANTERA BOLÍVAR FRENTE 1	97
TABLA 22: GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA EL CONTROL CANTERA BOLÍVAR FRENTE 2.....	98
TABLA 23: GUÍA DE OBSERVACIÓN PARA EL CONTROL CANTERA CANTACA	98
TABLA 23: RECOLECCIÓN Y EDICIÓN FOTOGRÁFICA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. CANTERA CLARINES.....	99

TABLA 24: RECOLECCIÓN Y EDICIÓN FOTOGRÁFICA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. CANTERA BOLÍVAR FRENTE 1.....	101
TABLA 25: RECOLECCIÓN Y EDICIÓN FOTOGRÁFICA CONSTRUCTORA PEDECA C.A. CANTERA BOLÍVAR FRENTE 2.....	103
TABLA 26: RECOLECCIÓN Y EDICIÓN FOTOGRÁFICA CANTERA CANTACA	105
TABLA 27: REGISTRO FOTOGRÁFICO MUESTRA A.....	124
TABLA 28: TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS - MUESTRA A DISPERSA Y ORDENADA.....	124
TABLA 29: TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS – MUESTRA B DISPERSA Y ORDENADA.....	125
TABLA 30: TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA C DISPERSA Y ORDENADA.....	125
TABLA 31: TABLA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA D DISPERSA Y ORDENADA.....	125
TABLA 32: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO MUESTRA A.....	130
TABLA 33: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - MUESTRA B	131
TABLA 34: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - MUESTRA C	131
TABLA 35: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - MUESTRA D	132
TABLA 36: COMPARACIÓN DEL TAMAÑO MEDIO DE FRAGMENTACIÓN	135
“K50”	135
TABLA 37: COMPARACIÓN DEL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD “N”	135
TABLA 38: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA CLARINES - ESQUEMA 1.....	136
TABLA 39: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA CLARINES - ESQUEMA 2.....	136
TABLA 40: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA CLARINES - ESQUEMA 3.....	137
TABLA 41: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA CANTACA - ESQUEMA 1.....	138
TABLA 42: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA BOLÍVAR 1 - ESQUEMA 1.....	139
TABLA 43: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA BOLÍVAR 1 - ESQUEMA 4.....	139
TABLA 44: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA BOLÍVAR 2 - ESQUEMA 1.....	140

TABLA 45: COMPARACIÓN DE DATA TEÓRICA Y REAL DE LA CANTERA BOLÍVAR 2 - ESQUEMA 2.....	141
TABLA 46: PORCENTAJE DE ERROR DEL K50 EN FUNCIÓN DE LA ADMISIÓN MÁXIMA DEL TRITURADOR.....	142
TABLA 47: COMPARACIÓN DE UNA DISTRIBUCIÓN WEIBULL PROYECTADA CON UNA AJUSTADA.....	143

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: UBICACIÓN GENERAL DE LAS CANTERAS CLARINES, BOLÍVAR Y CANTACA.....	5
FIGURA 2: FORMACIÓN CARATAS.....	6
FIGURA 3: EXTENSIÓN GEOGRÁFICA FORMACIÓN LAS BRISAS	7
FIGURA 10: ESQUEMA DETERMINISTA DE OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA DE LA PERFORACIÓN Y VOLADURA	30
FIGURA 10: MÉTODO PARA LA INVESTIGACIÓN PROPUESTO POR LOS INVESTIGADORES.....	41
(ELABORACIÓN PROPIA).....	41
FIGURA 11: DISCRIMINACIÓN DE VARIABLES	55
FIGURA 4: FV CANTERA CLARINES EN LA CARA LIBRE 1	80
FIGURA 5: FV CANTERA CLARINES EN LA CARA LIBRE 2.....	80
FIGURA 6: VISUALIZACIÓN DE LOS SOBRETAMAÑOS DEL FRENTE DE VOLADURA	81
FIGURA 7: ZONA 1 DE VOLADURA EN CANTERA BOLÍVAR.....	82
FIGURA 8: VISUALIZACIÓN DE LOS SOBRETAMAÑOS DE LA ZONA 2 CANTERA BOLÍVAR	83
FIGURA 9: ÁREA DE VOLADURA CANTERA CANTACA.....	83
FIGURA 12: FRAGMENTACIÓN CANTERA CLARINES.....	92
FIGURA 13: ESPONJAMIENTO CANTERA CLARINES.....	93
FIGURA 14: EVALUACIÓN DEL SOBRETAMAÑO CONSTRUCTORA PEDECA C.A. BOLÍVAR	94
FIGURA 15: EVALUACIÓN DEL DESPLAZAMIENTO.....	94
FIGURA 16: EVALUACIÓN DEL SOBRETAMAÑO	95
FIGURA 17: EVALUACIÓN DE ESPONJAMIENTO Y DESPLAZAMIENTO.....	95
FIGURA 18: RESULTADO POSTERIOR A LA VOLADURA CANTACA	96
FIGURA 19. – VENTANA: MENÚ PRINCIPAL.....	114
FIGURA 20. – VENTANA: CREACIÓN. PESTAÑA: SCHEME 1.....	116
FIGURA 21. – VENTANA: CREACIÓN. PESTAÑA: SCHEME 2.....	117
FIGURA 22. – VENTANA: CREACIÓN. PESTAÑA: SCHEME 3.....	118
FIGURA 23. – VENTANA: REGISTRO – GENERAL	119
FIGURA 24. – VENTANA: REGISTRO – ADICIONALES	119
FIGURA 25. – VENTANA: CONTROL	120
FIGURA 26. – VENTANA: CONTROL- IMPORTAR DATOS FOTOGRÁFICOS	120
FIGURA 27. - VENTANA: MONITOREO.....	121

FIGURA 28.- VENTANA: AYUDA	122
FIGURA 29: MUESTRAS PARA EL ANÁLISIS	123
FIGURA 30: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA A DISPERSA, ORDENADA Y WEIBULL	127
FIGURA 31: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA B DISPERSA, ORDENADA Y WEIBULL	128
FIGURA 32: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA C DISPERSA, ORDENADA Y WEIBULL	128
FIGURA 33: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIAS MUESTRA D DISPERSA, ORDENADA Y WEIBULL	129
FIGURA 34: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA MUESTRA A	132
FIGURA 35: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA MUESTRA B.....	133
FIGURA 36 GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA MUESTRA C.....	133
FIGURA 37: GRÁFICA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA MUESTRA D	134

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: ITERACIÓN DEL DIÁMETRO	57
GRÁFICO 2: ITERACIÓN DE LA ALTURA VERSUS DIÁMETRO	58
GRÁFICO 3: ITERACIÓN DE LA DENSIDAD VERSUS DIÁMETRO	59
GRÁFICO 4: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE VERSUS DIÁMETRO	59
GRÁFICO 5: ITERACIÓN DEL FACTOR DE CARGA VERSUS EL DIÁMETRO Y LA RCS	60
GRÁFICO 6: ANÁLISIS DE VARIABLES DE KUZNETSOV.....	62
GRÁFICO 7: ANÁLISIS DE VARIABLES DE LARSON.....	64
GRÁFICO 8: ANÁLISIS DE VARIABLES DE SVEDEFO.....	65
GRÁFICO 9: ANÁLISIS DE VARIABLES RETIRO DE CHUNG Y KATSABANIS	66
GRÁFICO 10: ANÁLISIS DE LOS POSTULADOS DE FRAGMENTACIÓN EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE CARGA	68
GRÁFICO 11: ANÁLISIS DE LOS POSTULADOS DE FRAGMENTACIÓN EN FUNCIÓN DE LA ALTURA.....	69
GRÁFICO 12: ANÁLISIS DE LOS POSTULADOS DE FRAGMENTACIÓN EN FUNCIÓN DEL RETIRO.....	70
GRÁFICO 13: ANÁLISIS DE LOS POSTULADOS DE FRAGMENTACIÓN EN FUNCIÓN DE LA CARGA TOTAL.....	71
GRÁFICO 14: DISTRIBUCIÓN WEIBULL CON VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE UNIFORMIDAD.....	72
GRÁFICO 15: ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE UNIFORMIDAD DE CUNINGHAM.....	73

ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1: TAMAÑO MEDIO POR KUZNETSOV	11
ECUACIÓN 2: TAMAÑO MEDIO POR KUZNETSOV MODIFICADA	12
ECUACIÓN 3: TAMAÑO MEDIO POR LARSON	12
ECUACIÓN 4: TAMAÑO MEDIO POR SVEDEFO	12
ECUACIÓN 5: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD POR CHUNG Y KATSABANIS	13
ECUACIÓN 6: TAMAÑO MEDIO POR CHUNG Y KATSABANIS	13
ECUACIÓN 7: PASANTE 80 POR CHUNG Y KATSABANIS	13
ECUACIÓN 8: MODELO DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE WEIBULL	14
ECUACIÓN 9: MODELO KUZ-RAM	15
ECUACIÓN 10: KUZ-RAM SIMPLIFICADO	15
ECUACIÓN 11: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD SEGÚN CUNINGHAM	15
ECUACIÓN 12: CRITERIO DE STURGES	17
ECUACIÓN 13: LONGITUD DE INTERVALO	17
ECUACIÓN 14: FRECUENCIA RELATIVA DE CLASE	17
ECUACIÓN 15: FRECUENCIA RELATIVA ACUMULADA	18
ECUACIÓN 16: RETIRO SEGÚN LANGEFORS	20
ECUACIÓN 17: RETIRO SEGÚN UCAR	20
ECUACIÓN 18: CARGA LINEAL SEGÚN UCAR	20
ECUACIÓN 19: RETIRO SEGÚN FOLDESI	21
ECUACIÓN 20: PARÁMETRO M	21
ECUACIÓN 21: RETIRO SEGÚN LÓPEZ JIMERO	21
ECUACIÓN 22: FACTOR DE CORRECCIÓN F	21
ECUACIÓN 23: FACTOR DE CORRECCIÓN FR	21
ECUACIÓN 24: FACTOR DE CORRECCIÓN FE	21
ECUACIÓN 25: RETIRO SEGÚN KONYA Y WALTER	22
ECUACIÓN 26: RETIRO PRÁCTICO POR KONYA Y WALTER	22
ECUACIÓN 27: ESPACIAMIENTO SEGÚN ASH	22
ECUACIÓN 28: ESPACIAMIENTO SEGÚN FOLDESI	23
ECUACIÓN 29: SOBRE-PERFORACIÓN SEGÚN KONYA	24
ECUACIÓN 30: SOBRE PERFORACIÓN POR ASH	25
ECUACIÓN 31: CONCENTRACIÓN DE CARGA LINEAL SEGÚN KONYA	25
ECUACIÓN 32: ALTURA DE CARGADA DE FONDO SEGÚN KONYA	25
ECUACIÓN 33: ALTURA DE CARGADA DE COLUMNA SEGÚN KONYA	25
ECUACIÓN 34: FACTOR DE CARGA SEGÚN KONYA	25

INTRODUCCIÓN

Actualmente la operación unitaria de perforación y voladura en cantera a nivel mundial ha comenzado a implementar software especializado en minería para optimizar los resultados de dicha operación. El uso de la investigación de operaciones a través del método científico y herramientas computacionales, ha permitido desarrollar proyectos mineros que años atrás no eran considerados factibles.

Además, el uso de la tecnología en los procesos mineros, específicamente en la perforación y voladura de agregados en canteras, puede ocupar una parte importante de la estructura de costos de las empresas. Por lo cual, software especializados representan una alternativa para optimizar el diseño de los patrones de voladura y factor de carga, de tal manera, que maximicen la recuperación del material volado con los menores costos durante la operación.

En 2012 Darlington Mensah, expuso que la creación de software en el diseño de los patrones de voladura, posee potencial para el modelamiento matemático de las variables controlables de voladura y la fragmentación final, lo que influye de manera directa en la reducción de los costos de la voladura. Basados en esta premisa, los autores del presente trabajo de investigación diseñaron en el año 2015, como parte de la asignatura Investigación Aplicada de código 3283, un software con fines educativos, de código libre y con funciones para los cálculos básicos de diseño de voladuras, el software llamado BlastScheme.

En vista de las limitantes en la funcionalidad observadas en el software BlastScheme, la presente investigación plantea su adaptación a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras, basados en modelos, principios y teorías como la investigación de operaciones, haciendo uso de la programación no lineal y el método de búsqueda directa restringida; modelos de fragmentación, modelos estadísticos, entre otros fundamentos teóricos. A modo de dar respuesta a la necesidad de un software especializado en el modelamiento, proyección y control de voladuras, que a su vez haga frente a las características geológicas y operativas propias de las empresas que laboran en la región y, de igual manera, responda a la

carencia de una herramienta tecnológica de este tipo en el Departamento de Minas, de la Universidad Central de Venezuela.

Para lograr dicha adaptación, el presente trabajo de investigación se construye en base a tres capítulos. Un primer capítulo, donde se presentan las teorías fundamentales para el desarrollo de la investigación, tales como, la investigación de operaciones, los modelos matemáticos de fragmentación y los fundamentos para el diseño de voladuras en canteras. El segundo capítulo presenta el método de investigación propuesto, donde se describe el tipo y diseño de investigación, así como, las fases y tareas necesarias para dar cumplimiento a los objetivos planteados. El tercer capítulo se enfoca en los resultados y su análisis, donde estacan las guías de observación, los algoritmos diseñados, la interfaz adaptada del BlastScheme y la verificación de los resultados obtenidos mediante esta nueva herramienta.

I. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se describe la problemática que llevó a los investigadores a desarrollar la presente investigación, así como los objetivos planteados para generar una solución a dicho problema. Por otro lado, se exponen las razones que justifican la realización de la adaptación del software BlastScheme a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras.

I.1- Planteamiento del problema

El proceso productivo de la mina depende en gran medida de la operación unitaria de arranque. En su mayoría la extracción de agregados en canteras se realiza mediante perforación y voladura de rocas, por lo cual existe la tendencia de implementar algunos programas computarizados especializados en minería para lograr estimar los resultados de la voladura. En Venezuela, el acceso a herramientas en minería, como: *MineSight*, *Vulcan Mincom*, entre otros, es limitado porque son desarrollados por compañías internacionales y para la adquisición de la licencia se debe pagar en moneda extranjera, además, estas aplicaciones no fueron diseñadas para funcionar acorde a las características propias de los yacimientos venezolanos. En el Departamento de Minas de la Universidad Central de Venezuela, hasta el año 2015 no se había creado una aplicación de computador que permitiera modelar las operaciones unitarias, entre estas, el proceso de perforación y voladura, acorde a las características y necesidades de nuestro sector minero venezolano.

Motivados por esta necesidad, los autores diseñaron en el año 2015 un software con fines educativos, de código libre y especializado en el área de voladura en canteras, el software llamado BlastScheme. Con esta iniciativa se logró demostrar que es posible obtener aplicaciones de escritorio con la finalidad de modelar múltiples procesos de arranque indirecto, observando los efectos de cada variable sobre el resultado final, así como, disminuir el tiempo invertido en realizar estos cálculos de forma manual. Sin embargo, esta aplicación carece de funciones específicas que permitan: modelar las variables controlables de la voladura, adaptándose a las características geológicas y operativas propias del yacimiento; proyectar el resultado

final de la voladura, garantizando un producto con las especificaciones granulométricas de la planta de procesamiento mineral; y controlar el proceso de voladura a través del registro de reportes históricos; de este modo optimizarlo en el tiempo. En tal sentido, en la presente investigación se plantea adaptar el software BlastScheme, a la operación unitaria de perforación y voladura, permitiendo el modelamiento, proyección y control de dicha operación, dentro del sujeto de estudio de la investigación.

I.2 Objetivos de la investigación

I.2.1 Objetivo general

Adaptar el software BlastScheme a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras.

I.2.2 Objetivos específicos

- Formular los instrumentos cualitativos y cuantitativos que permitan la recolección de información correspondiente a las variables que intervienen en el modelamiento, proyección y control del proceso de voladura.
- Aplicar los instrumentos cualitativos y cuantitativos en la recolección de las variables en el sujeto de estudio.
- Plantear los algoritmos de las funciones requeridas en el modelamiento, proyección y control de la operación unitaria de arranque indirecto.
- Diseñar la interfaz que integre los algoritmos y la información recolectada mediante los instrumentos.
- Verificar los resultados obtenidos en el software a través de la comparación con la información recolectada en campo.

I.3 Justificación de la investigación

Debido a que la mayor parte de las operaciones unitarias de arranque en canteras, se llevan a cabo por perforación y voladura, la cual puede ocupar parte importante dentro de las estructuras de costos de las operadoras mineras. Surge la necesidad de

optimizar dichos patrones, de tal manera que se logre maximizar la recuperación del material volado con los menores costos durante la operación.

Mensah 2012 expresa que la creación de software en el diseño de los patrones para voladura, poseen potencial para el modelamiento matemático de las variables controlables de voladura y la fragmentación final, lo que puede influir de manera directa en la reducción de costos de esta operación.

En este marco de ideas, la presente investigación representa un beneficio directo para canteras que lleven a cabo un proceso de arranque mediante perforación y voladura, en vista de que podrán contar con una herramienta que modele múltiples escenarios, proyecte los resultados finales y controle de forma continua modificaciones dentro la operación. Mientras, el beneficio a la academia está en la creación de nuevas líneas de investigación en materia de minería ligada al diseño de software. Por último, la importancia de este trabajo radica en la búsqueda de impulsar nuevos aspectos en el desarrollo tecnológico minero del país y de la industria minera.

1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los antecedentes nacionales e internacionales, entre los que destacan investigaciones desarrolladas por autores que han incursionado en temas como: optimización de patrones de voladura, modelamiento de operaciones mineras a partir de *software*, evaluación técnica y diseño de herramientas computacionales para minería. Por otra parte, se describe al sujeto de estudio de la investigación, en que se detallan las diferentes ubicaciones de la toma de datos, así como, sus características geológicas y características operativas.

Como tercera parte, se desarrollan las definiciones y fundamentos teóricos del trabajo, comenzando con la investigación de operaciones como base del estudio de modelos y optimización de resultados, así como, los modelos, teorías y principios de la perforación y voladura de rocas en minería a cielo abierto utilizadas en la presente investigación.

1.1 Antecedentes nacionales de investigación

Un software libre para modelar patrones de voladura en minería a cielo abierto, Anjoul y Utches (2015). Este estudio tuvo como objetivo general el diseño de un software libre que permitiera modelar la operación unitaria de voladura en canteras. Este software buscó en primera instancia beneficiar directamente a los estudiantes de Ingeniería de Minas, los cuales manifestaban una necesidad de manejar software libre para minería, especialmente para las labores de diseño de patrones de voladura en minería a cielo abierto. El proceso de diseño de este software consistió en examinar las bases teóricas para calcular y modelar las variables controlables de una voladura, además, de generar la distribución granulométrica resultante de la misma; los cuales posteriormente componen los algoritmos computacionales necesarios, diseñando la interfaz que permitiera operar los algoritmos computacionales. Dicha interfaz se puede observar en el Anexo 1, donde se detallan las características de la aplicación, así como, la funcionalidad de la misma. La investigación concluyó que el diseño de un software libre contribuye en la planificación de una voladura, en vista que permite modelar múltiples escenarios, ver los efectos de la variación en los parámetros

iniciales de diseño sobre la granulometría final, y disminuir el tiempo invertido en realizar estos cálculos de forma manual.

Planificación a corto plazo de nuevas áreas de explotación en las canteras de con piedra y la concepción. ciudad guayana, venezuela, Utches (2015). Este los objetivos de este estudio, se planteo establecer los parámetros de voladura en los sucesivos avances de mina dentro de las canteras de Con Piedra y La Concepción, pertenecientes a la Corporación Venezolana de Cementos. Para lo cual se aplicó el software *BlastScheme*, como una herramienta para modelar el tamaño medio de fragmentación producto de los esquemas de voladura de la mina, lo cual fue comparado por medio de análisis fotográficos con los registros históricos, determinando con esto que el software tenía la capacidad de aproximarse a los resultados reales.

Análisis de la perforación y tronadura en El Soldado, Quiroga (2013). El trabajo desarrolla detalladamente un estudio de campo de la operación de voladura, con el objetivo de revisar y analizar el proceso de reducción de tamaño mina-planta, así como, proponer posibles ajustes de los diseños de perforación y voladura, conducentes a mejorar los resultados granulométricos. Para esto toma en cuenta los siguientes ítems: granulometría del producto de la voladura, protocolo para la toma y análisis de fotografías, análisis de resultados de la voladura, análisis de resultados del producto de la voladura, análisis de resultados en el rendimiento de las palas, análisis de resultados en el rendimiento de la planta, análisis de variables, variables representativas y variable dominante.

Diseño de patrones de perforación y voladura, para normalizar la fragmentación del material resultante de la mina Choco 10 empresa PMG S. A. El Callao, edo. Bolívar. Artigas (2012). El trabajo expone una propuesta para el diseño de los patrones de perforación y voladura que normalicen la fragmentación del material que es extraído en la Mina Choco 10, ubicada en el Municipio El Callao, estado Bolívar; lo cual realizó mediante cálculos teóricos y la posterior evaluación de la fragmentación resultante en las voladuras. Esta investigación destaca lo referente a los modelos de predicción de fragmentación por Kuz-Ram, así como, lo referente a

los instrumentos, técnicas y análisis de datos que se realizan en las labores de voladura.

Optimización de los patrones de voladura en función de las características del explosivo y de la roca perteneciente a la mina Paso Diablo, edo. Zulia. Arnaudez (2005). El trabajo de investigación propone optimizar los patrones de perforación y voladura que para la fecha se utilizan en la mina Paso Diablo, ubicada en el Municipio Mara, estado Zulia. El autor describe de forma detallada un método de optimización de variables controlables de voladura por medio de la utilización de la herramienta Solver de Microsoft Excel, este método representa un acercamiento a la utilización de software para la optimización de voladuras.

Análisis y evaluación técnica de la implantación del software Drill & Blast de Mincom a las operaciones de perforación y voladura de la mina Paso Diablo, Municipio Páez, edo. Zulia. Castillo. (2002). El estudio se realizó motivado por la búsqueda de la empresa en tecnificar las operaciones de perforación y voladura por medio de la implantación de programas computacionales especializados. Esta investigación logró concluir que este programa presenta ventajas en cuanto a lo siguiente: fácil generación de patrones de perforación, generación de tablas de coordenadas, exportación e importación de datos, modelado de mantos de carbón reales, generación de tablas de explosivos por barrenos, generación de sistemas de amarre, registro de inventarios de las voladuras realizadas, y por último, posee la opción de separar las voladuras por bloques y por niveles. En cuanto a las desventajas, la investigación determinó que es una herramienta de difícil manejo para los usuarios, y presenta inconveniente con la geología local de la mina que altera de forma constante los diseños propuestos.

1.2 Antecedentes internacionales de la investigación

Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada, Díaz, Guarín y Jiménez (2012). El estudio, apoyado por la Universidad Nacional de Colombia, describe el análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de

superficie, empleando el enfoque de la programación estructurada. El propósito de este trabajo fue crear una interfaz, por medio de la cual se ingresan la densidad del explosivo, diámetro e inclinación de la perforación, resistencia a la compresión de la roca y dimensiones del banco; para luego obtener el valor de las variables más importantes que acondicionan el diseño de la operación de perforación y voladuras. Esta aproximación permitió diseñar la operación de perforación y voladuras en menor tiempo y disminuir el error humano que se tiene por el uso repetitivo de las fórmulas para cálculos de los parámetros involucrados en su diseño.

Un software para el diseño de voladuras en minería a cielo abierto, Mensah. (2012). El estudio tuvo como objetivo elaborar un programa de ordenador en Visual Basic, que permitiera diseñar voladuras a cielo abierto. El software incorpora, el cálculo del tamaño medio del escombros a partir del modelo de fragmentación Kuz-Ram, y la obtención del coste de la voladura. La eficacia del software se evaluó en tres voladuras realizadas en AngloGold Ashanti, Iduapriem Mine, Adamus Resources y Bonikro Gold Mine.

1.3 Sujeto de estudio de la investigación

El sujeto de estudio se refiere al alcance geográfico que requiere la investigación para llevar a cabo sus objetivos, es decir, hace referencia a los lugares en los cuales se va a realizar la investigación y a los cuales se van a aplicar o generalizar los resultados. (Hurtado, 2015)

Para esta investigación los sujetos de estudio son cuatro procesos de perforación y voladura en canteras. Tres de los procesos son realizados en la empresa Constructora Pedeca C.A., específicamente en sus canteras de Clarines y Bolívar, el cuarto proceso fue realizado en la empresa Cantaca C.A.

1.3.1 Localización geográfica de las canteras

La cantera Clarines perteneciente a la empresa Constructora Pedeca C.A. se encuentra ubicada en el estado Anzoátegui, aproximadamente a 15 km de la población de Clarines, ingresando por la Troncal 9, frente a las Industrias Aguamarina de La Costa C.A.

LA cantera Bolívar pertenece igualmente a la empresa Constructora Pedeca C.A. y se encuentra ubicada en el estado Bolívar, aproximadamente a 3 km del Distribuidor Marhuanta, ingresando por la Troncal 19 en dirección Ciudad Bolívar-Ciudad Piar, frente a la Planta Sisor.

La cantera Cantaca C.A., está ubicada en el estado Carabobo, a un km del Distribuidor Yagua, por la Troncal 1 en dirección Caracas-Valencia. La ubicación general de las canteras se muestra en la Figura 1.



Figura 1: Ubicación general de las canteras Clarines, Bolívar y Cantaca.

(Tomada y editada de Google Earth 26/10/2016)

1.3.2 Características geológicas de las canteras

De acuerdo a la ubicación geográfica de las canteras y de las características geológicas de los frentes de voladura, se ubicaron los yacimientos en las unidades litológicas de: Caratas para la cantera Clarines, Imataca para la cantera Bolívar y Las Brisas para la cantera Cantaca.

1.3.2.1 Formación Caratas

La Formación Caratas, aflora en toda la región piemontina del Norte de los estados Anzoátegui y Monagas (PDVSA, 2016), tal como se observa en la Figura 2.

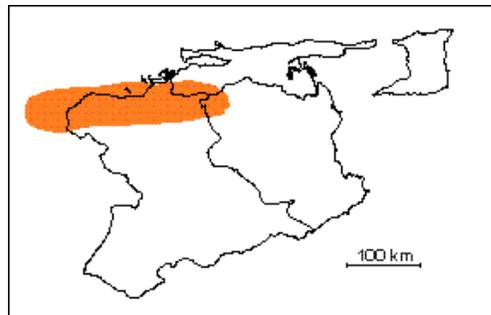


Figura 2: Formación Caratas

(Tomada del Léxico Estratigráfico de PDVSA, 10/10/2016, <http://www.pdv.com/lexico/>)

Campos (1985), citado en el Léxico Estratigráfico, describe a la Formación Caratas en el subsuelo del Noreste del estado Anzoátegui como una formación compuesta predominantemente de metacalizas grises a gris verdoso, masivas, recrystalizadas y glauconíticas, con ocasionales intercalaciones de latita.

1.3.2.2 Provincia Geológica de Imataca

Litológicamente se describe que la Provincia de Imataca está formada por gneises graníticos, granulitas félsicas, anfibolitas, granulitas máficas y ultramáficas, también con cantidades menores de formaciones bandeadas de hierro (*BIF*, por sus siglas en inglés) tipo algoma, dolomitas, charnockitas, anortositas y granitos intrusivos más jóvenes. (Gamero, Hurtado & De Abrisqueta, 2014)

1.3.2.3 Las Brisas

La zona de estudio pertenece a la Formación Las Brisas, una formación que aflora a todo lo largo del macizo central de la Cordillera de La Costa, entre el Cabo Codera y el graben del río Yaracuy. Como se observa en la Figura 3.

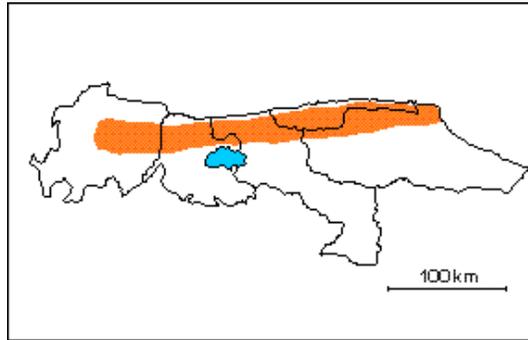


Figura 3: Extensión geográfica Formación Las Brisas

(Tomada del Léxico Estratigráfico de PDVSA, 10/10/2016, <http://www.pdv.com/lexico/>)

Smith (1952) citado en el Léxico Estratigráfico, divide la formación en dos miembros: Miembro Inferior constituido por gneises y esquistos microclínicos conglomeráticos y Miembro Superior, formado casi enteramente por esquistos sericíticos. Este autor expresa que, los grupos litológicos de los Miembros Inferior y Superior, se originan de conglomerados y lutitas respectivamente, y que las metacalizas son de origen biotermal.

1.4 Definiciones y fundamentos teóricos

A continuación se presentan los fundamentos teóricos de la investigación de operaciones como disciplina que permite desarrollar el presente trabajo. A su vez, se muestran modelos matemáticos de distribución de tamaños post-voladura y el modelo de distribución granulométrica usado. De igual manera, se exponen los fundamentos de diseño de voladura en canteras y, por último, los términos fundamentales para la investigación y teorías tales como: propiedades de los explosivos, variables controlables de una voladura, cálculo de retiro para voladuras en banco y cálculos de distribución de carga explosiva.

1.4.1 Investigación de operaciones

Hillier y Lieberman (2010), describen la Investigación de Operaciones (IO) como una disciplina que se aplica principalmente a las problemáticas relacionadas con la conducción y la coordinación de actividades en una organización. Los autores señalan, que la IO incluye el término investigación en el nombre, porque utiliza un enfoque similar al que se aplica en las áreas científicas establecidas para explorar los diversos problemas que deben ser enfrentados.

Una característica adicional de la IO, es que intenta encontrar una mejor solución conocida como la óptima para el problema en cuestión. Se dice una mejor solución y no la mejor, porque es posible que existan muchas que puedan considerarse como las mejores. En lugar de conformarse con mejorar el estado de las cosas, la meta es identificar el mejor curso de acción posible. Aun cuando debe interpretarse con todo cuidado en términos de las necesidades reales de la administración, esta “búsqueda del mejor camino” es un aspecto importante de la IO. (Hillier y Lieberman 2010)

1.4.1.1 Fases del estudio de Investigación de Operaciones

Taha (2012), describe los lineamientos generales para la implementación de la IO en la práctica, iniciando con la definición del problema, lo cual implica definir el alcance del problema investigado, lo que lleva a identificar tres elementos principales del problema de decisión: descripción de las alternativas de decisión, determinación del objetivo del estudio y especificación de las limitaciones bajo las cuales funciona el sistema modelado.

Conocido el problema, se procede a la construcción del modelo matemático que incluye un intento para transformar la definición del problema en relaciones matemáticas. Planteado en forma de ecuaciones, es posible idear la solución del modelo usando algoritmos de optimización bien definidos para solucionar el modelo propuesto. Un aspecto importante de la fase de solución del modelo es el análisis de sensibilidad, el cual tiene que ver con la obtención de información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando el modelo experimenta algunos cambios de parámetros.

Adicional al conocimiento del modelo, es necesario determinar la validez del mismo, la cual consiste en comprobar si el modelo propuesto hace en realidad lo que dice que hace. Si la respuesta a este análisis de validez es afirmativa, se procede a la implementación de la solución. Un modelo validado, implica la transformación de los resultados en instrucciones de operación comprensibles, que se emitirán a las personas que administrarán el sistema recomendado.

1.4.1.2 Componentes de un problema de optimización

Naghi (1985) explica que todo modelo lineal o no lineal posee la siguiente estructura:

- Variables de decisión: es el conjunto de variables cuya magnitud se desea determinar resolviendo el modelo de programación lineal.
- Restricciones: es el conjunto de desigualdades que limitan los valores que puedan tomar las variables de decisión en la solución.
- La función objetivo: es la meta o finalidad del análisis o investigación. Es la función matemática que relaciona las variables de decisión.
- Linealidad: son las relaciones entre las variables, tanto en la función objetivo como en las restricciones debe ser lineal.
- Desigualdades cerradas (flexibles): las desigualdades utilizadas para representar las restricciones deben ser cerradas o flexibles, es decir, menor-igual o mayor-igual. No se permiten desigualdades de los tipos menor-estrictamente o mayor-estrictamente, o abiertas.
- Condición de no-negatividad: en la programación lineal las variables de decisión sólo pueden tomar valores de cero a positivos. No se permiten valores negativos.

1.4.1.3 Programación no lineal

La investigación de operaciones utiliza el término programación no lineal, para referirse a la clase de problemas que se dan cuando la función objetivo es de tipo no lineal, y/o una o más restricciones son expresadas a través de funciones no lineales. Típicamente, una función no lineal es una relación matemática algebraica donde las variables están multiplicándose, o están elevadas a una exponente diferente de la unidad, o donde las variables son los argumentos de funciones trigonométricas,

logarítmicas o exponenciales. La no linealidad de las funciones involucradas genera uno de los problemas fundamentales de la programación no lineal, ya que esta puede tener soluciones óptimas locales además de la solución óptima global. (Escobar, Gallego, & Romero, 2014)

a) Búsqueda directa restringida

La idea general de los métodos de búsqueda directa es muy simple. Primero, se identifica un intervalo llamado intervalo de incertidumbre, que se sabe incluye el óptimo, entonces, sistemáticamente se reduce el intervalo de confianza de una forma que garantice que los óptimos no se pierden. El procedimiento no determina el óptimo exacto, pero en lugar de eso minimiza la longitud del intervalo que incluye el punto óptimo. Teóricamente, la longitud del intervalo que incluye el óptimo puede hacerse tan pequeña como se desee (Taha, 2012).

Una de las limitaciones supone, que la función optimizada es unimodal sobre el intervalo de búsqueda. Esto garantiza únicamente un óptimo local y, además, no existe ningún intervalo finito en el cual la pendiente de la función sea cero (Taha, 2012).

1.4.2 Modelos utilizados en la investigación

En esta sección se exponen los modelos utilizados en la investigación. En primer lugar, se presentan los modelos matemáticos para la distribución de tamaños post-voladura y en segundo lugar los modelos estadísticos para el cálculo de distribución de frecuencias en variables cuantitativas continuas.

1.4.2.1 Modelos matemáticos para la distribución de tamaños post-voladura

Los modelos de predicción granulométrica son herramientas de gran utilidad para el cálculo de patrones de voladura, ya que permiten estimar la granulometría media del material, mejor conocida como la abertura de la malla cuadrada que deja pasar el 50% del material (k_{50}), para de esta forma controlar de manera más eficiente los resultados de la voladura y a su vez solventar los problemas de sobretamaños o sobre

trituration que afectan el rendimiento de los equipos de carga, acarreo y planta (Jimero & otros 2012).

Sobre la fragmentación influyen un gran número de variables controlables, así como las propias características de los macizos rocosos. La optimización de cualquier operación de arranque por explosivos pasa por el conocimiento previo, aunque sea aproximado, de los tamaños de la roca volada en unas condiciones determinadas. Es importante señalar que no existe un método o fórmula de predicción exacta, pero en los últimos años un gran número de investigadores han trabajado en dicho campo llegando a modelos que van desde las simples fórmulas empíricas a complejas simulaciones con ordenador (Jimero & otros 2012).

a) Tamaño medio de fragmentación

Jimero & otros (2012), señalan como principal precursor de los modelos de fragmentación en voladuras a Kuznetsov, quien en 1973 postuló una ecuación para el tamaño medio de bloque en función de factores de la roca, el volumen de roca fragmentada por un barreno y la carga del explosivo dentro de un barreno expresada en TNT equivalente. Esta ecuación se presentó originalmente como en la Ecuación 1.

Ecuación 1: Tamaño medio por Kuznetsov

$$K50 = Fr * \left[\frac{VRo}{Q} \right]^{0,8} * Q^{1/6} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde

K50: tamaño medio de los fragmentos de voladura (cm)

Fr: factor de roca, el cual se obtiene de la Tabla 1 tomada de Segarra (2004)

VRo: volumen de roca fragmentadas por barreno en (m³)

Q: cantidad de TNT equivalente a la carga de explosivo por barreno (kg)

Tabla 1: Factor de roca

Comportamiento de la voladura	Tipo de roca	Factor de roca	Factor de carga (kg/m3)	Constante de roca (kg/m3)
Mala	Andesita, dolomita, granito	12-14	0.70	0.62
Regular	Dolomita, cuarcita, serpentina	10-11	0.45	0.40
Buena	Arenisca, caliza, pizarra	8-9	0.30	0.27
Muy buena	Carbón	6	0.15-0.25	0.14-0.22

Tomada de Segarra (2004)

Posteriormente, se modifica la ecuación de Kuznetsov (1973), en cuanto al término “Q”, en función de la potencia relativa en peso del explosivo empleado, el consumo específico y la carga del explosivo dentro del barreno en kg. Esta modificación se presenta en la Ecuación 2.

Ecuación 2: Tamaño medio por Kuznetsov modificada

$$K50 = Fr * [CE]^{-0,8} * Qb^{\frac{1}{6}} * \left[\frac{115}{PRP} \right]^{19/30} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Ce: consumo específico de explosivo en (kg/cm³)

PRP (RWS): potencia relativa en peso del explosivo utilizado

Qb: carga del explosivo dentro del barreno en (kg)

Jimero & otros (2012) igualmente señalan que en 1973, Larson postuló una ecuación que permite determinar el valor del k50 conociendo el retiro, la relación espaciamento-retiro, constantes de la roca y constantes de voladura en función de las características geológicas del macizo rocoso, esta expresión se observa en la Ecuación 3.

Ecuación 3: Tamaño medio por Larson

$$K50 = S \times e^{(0,58 \times \ln(B) - 0,145 \times \ln(\frac{S}{B}) - 1,18 \times \ln(\frac{CE}{c}) - 0,82)} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

K50: tamaño medio de bloque (m)

B: retiro (m)

S/B: relación espaciamento retiro

CE: consumo específico de explosivos en (Kg/m³)

C: constante de la roca. Equivalente al consumo específico de explosivo gelatinoso necesario para fragmentar la roca y se puede obtener de la Tabla 1.

S: constante de volabilidad, es un factor que tiene en cuenta la heterogeneidad del material y discontinuidades del macizo rocoso.

Jimero & otros (2012) por ultimo describen que en 1987 la fundación Swedish Detonic Research Foundation (SveDeFo) propone una ecuación modificada de Larson (1973), donde formula el cálculo del K50. Esta se presenta en la Ecuación 4.

Ecuación 4: Tamaño medio por SveDeFo

$$K50 = \frac{1}{6.99} * \left(B^2 * \sqrt{\frac{1.25}{s/b}} \right)^{0.29} * \left(\frac{c}{s*qt} \right)^{1.35} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde

B: retiro (m)

CE: consumo específico de explosivos (kg/m^3)

C: constante de la roca (Kg/m^3)

S: fuerza con respecto a una dinamita sueca (LFB), que combina el calor de la explosión y el volumen de los gases (relación 5:1 respectivamente) donde para el Anfo se considera 0,84.

Qt: carga específica (Kg/m^3)

Segarra (2004) señala que en 1991 Chung y Katsabanis proponen un modelo que parte de los modelos de fragmentación de Weibull y Normal para modelar la distribución granulométrica resultante de la voladura. Donde se toma como base la Ecuación 5.

Ecuación 5: Coeficiente de uniformidad por Chung y Katsabanis

$$n = \frac{0.842}{\ln(x80) - \ln(x50)} \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde:

n: es el índice de uniformidad de la distribución granulométrica

x50: es la media de la distribución (cm)

x80: es el percentil 80 de la distribución (cm)

Adicionalmente, Chung & Katsabanis (1991) proponen una ecuación que permite determinar los valores de x50 y de x80 en función de los parámetros de la voladura, tal como se presentan en la Ecuación 6.

Ecuación 6: Tamaño medio por Chung y Katsabanis

$$X50 = A * B^{-0.023} * S^{0.024} * H^{0.036} * Qe^{0.037} * q^{-1.230} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde:

A: es el factor de roca, que se obtiene de la tabla 1 (kg/m^3)

Qe: es la cantidad de explosivos en (kg)

S: espaciamiento (m)

B: retiro (m)

H: altura del banco (m)

q: factor de carga (kg/m^3)

De igual manera se plantea la Ecuación 7 para el x80:

Ecuación 7: Pasante 80 por Chung y Katsabanis

$$X80 = 3A * B^{-0.347} * S^{-0.057} * H^{0.041} * q^{-1.07} \text{ (Ecuación 7)}$$

Donde:

A: es el factor de roca, que se obtiene de la tabla 1 (kg/m^3)

Qe: es la cantidad de explosivos en (kg)

S: espaciamiento (m)

B: retiro (m)

H: altura del banco (m)

q: factor de carga (kg/m³)

b) Modelos de distribución granulométrica

Sanchidrián (2013), señala que la granulometría de la roca se ha venido representando a lo largo de los años, casi exclusivamente, mediante la distribución de Rosin-Rammler (o Weibull). Rosin-Rammler representa la distribución granulométrica por medio de una ecuación que depende de parámetros de escala y parámetros de forma, en un intervalo de dimensiones finito, como se presenta en la Ecuación 8.

Ecuación 8: Modelo de distribución granulométrica de Weibull

$$F_{wrr} = 1 - \exp \left[-Ln(2) * \left(\frac{x}{x_c} \right)^n \right] ; 0 \leq x < \infty \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde:

F_{wrr}: Función de fragmentación dependiente de x

X: abertura de la malla

X_c: tamaño característico que representa el 63.33%

n: índice de uniformidad

Sanchidrián (2013), presenta un estudio donde evalúa a gran escala 17 distribuciones: Weibull (WRR), Grady (GRA), log-normal (LGN), log-logística (LGL) y Gilvarry (GIL), en su forma simple de dominio semi-infinito, en una forma transformada de tipo truncada, y en forma bi-componente; junto a ellas, la distribución Swebrec (SWE) y su extensión bi-componente (ExSWE) completando la lista. La base de datos de fragmentación fue de 1234 curvas granulométricas obtenidas por cribado. Del estudio presentado por el investigador se concluye que, en términos de coeficiente de determinación, Rosin-Rammler (WRR) es la distribución de dos parámetros que mejor describe la granulometría de los fragmentos de roca. Entre las truncadas, Swebrec truncada (SWE) y Rosin-Rammler truncada (TWRR) son las mejores.

Sanchidrián (2013), igualmente señala que se han calculado los errores en la estimación de tamaños por las distribuciones ajustadas en cuatro zonas: gruesos, central, finos y muy finos, definidas arbitrariamente por los porcentajes para 100, 80, 20, 2 y 0 %. Los errores son bajos en la zona central, y aumentan hacia los extremos

gruesos y finos. Por medio de los cuales el autor presenta como conclusión, que los modelos de TWRR, TGRA y SWE son generalmente las mejores funciones truncadas en todos los tipos de material; estas funciones aún pueden usarse si se aceptan errores de un 25 % en los finos, aunque el error máximo puede llegar a ser mayor del 100 %.

c) Formulación del modelo Kuz-Ram

El modelo es desarrollado por Claude Cuninghan en el año 1983, a partir de la curva de distribución granulométrica de Rosin-Rammler (Ecuación 8) y la fórmula empírica del tamaño medio de los fragmentos procedentes de la voladura propuesta por Kuznetsov (Ecuación 1). Con la fórmula de Kuznetsov se obtiene el valor medio de “x”, para un valor de $F(x) = 0,50$ que representa la distribución media, quedando como la ecuación 9 y su forma simplificada como la ecuación 10.

Ecuación 9: Modelo Kuz-Ram

$$0,50 = [e]^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^n} \quad (\text{Ecuación 9})$$

De donde resulta:

Ecuación 10: Kuz-Ram simplificado

$$X_0 = X_{50} = \frac{x}{(0,693)^{\frac{1}{n}}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

X_0 : tamaño característico, y corresponde a la dimensión X

X: tamaño de referencia o abertura de malla

n: índice de uniformidad

El valor del índice de uniformidad guarda relación con los parámetros geométricos de la voladura, este valor “n” determina la forma de la curva granulométrica y varía comúnmente entre 0,8 y 2,2. Un valor alto indica fragmentación uniforme, mientras que unos valores pequeños reflejan tanto cantidades importantes de finos como de gruesos. (Aduvire, 1994)

Segarra indica que el algoritmo para calcular “n” según Cuningham (1987) es el siguiente:

Ecuación 11: Coeficiente de uniformidad según Cuningham

$$n = \left[2,2 - 14 \frac{B}{d} \right] * \left[1 - \frac{W}{B} \right] * \left[1 + \frac{R-1}{2} \right]^{0,5} * \left[\frac{Lo}{H} \right] \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde
B: retiro (m)
d: diámetro del barreno (mm)
W: desviación de la perforación (m)
R: relación espaciamiento retiro
Lo: longitud de carga (m)
H: altura del banco (m)

En relación al modelo Kuz-Ram y sus aplicaciones, López (2012) señala las siguientes limitaciones y consideraciones para el modelo:

- La relación S/B no debe exceder a 2 unidades y está aplicada al esquema de perforación y no a la secuencia de encendido.
- 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 fragmentación y homogeneidad del macizo requiere un estudio cuidadoso, especialmente, cuando el espaciamiento entre discontinuidades es más pequeño que la distancia entre barrenos.

1.4.2.2 Modelos estadísticos para el cálculo de distribución de frecuencias en variables cuantitativas continuas

Pierdant (Universidad de San Carlos (USAC), 2016) (2006), señala que cuando la variable en análisis es de tipo continua, la construcción de una tabla de frecuencias presenta como su punto de mayor importancia, la determinación de intervalos o clases que la formarán. Una clase, o intervalo de clase, es el elemento que permite condensar en mayor grado un conjunto de datos con el propósito de hacer un resumen de ellos. El número de casos o mediciones que quedan dentro de un intervalo recibe el nombre de frecuencia del intervalo, y se denota con f_i . La diferencia entre el extremo mayor y el extremo menor del intervalo se llama longitud o ancho del intervalo.

El mismo autor señala los pasos a seguir para la construcción de una tabla de frecuencias, los cuales se presentan a continuación:

- Determinar el número de intervalos o clases en la tabla (k), en función al número de datos a condensar, para ello se utiliza la fórmula de Sturges, la cual determina

el número aproximado de intervalos en función del número de datos a tratar. Esta fórmula se escribe de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 12: Criterio de Sturges} \\ K = 1 + 3,3220 * \log(n) \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde:

n : Número de datos a condensar en la tabla

- Determinar la longitud, ancho o tamaño del intervalo (t_i). Esta longitud es la misma para todos los intervalos en la tabla de frecuencias y se determina mediante la Ecuación 13:

Ecuación 13: Longitud de intervalo

$$t_i = (\text{dato mayor} - \text{dato menor}) / k \text{ (Ecuación 13)}$$

Donde:

t_i : tamaño del intervalo

k : número de clases

- Indicar el límite inferior de la primera clase, el cual puede ser un valor igual o menor al dato de valor mínimo del conjunto de datos. Luego para fijar el límite superior, sumamos el tamaño del intervalo para fijar el límite superior del intervalo. Los intervalos generados en esta etapa, se le conocen como los intervalos de clase ficticios.
- Se construyen los intervalos de clase reales, restando media unidad a los límites inferiores de los intervalos ficticios y se les agrega media unidad a los límites superiores de los mismos.
- Se efectúa la clasificación de los datos en cada intervalo para determinar así la frecuencia absoluta de cada clase (f_i).
- Se calcula la frecuencia acumulada de clase (F_i), la cual se obtiene al sumar la frecuencia de clase i con la frecuencia de las clases que la preceden. Este cálculo tiene como objetivo informar el número de datos que se hallan distribuidos en los intervalos que preceden al intervalo i .
- Se calcula la marca de clase (m_i), constituida por el punto medio del intervalo de clase.
- Se calcula la frecuencia relativa de clase (f_i/n), determinada mediante la expresión:

Ecuación 14: Frecuencia relativa de clase

$$f_i/n = \text{frecuencia absoluta de la clase} / \text{total de datos} \text{ (Ecuación 14)}$$

- Calcular la frecuencia relativa acumulada de la clase i (F_i/n), la cual se determina mediante la siguiente expresión:

Ecuación 15: Frecuencia relativa acumulada

$$F_i/n = \text{frecuencia acumulada en la clase } i / \text{total de datos (Ecuación 15)}$$

Si a este cociente se le multiplica por 100, entonces se obtiene un porcentaje denominado frecuencia acumulada relativa porcentual (acumulado porcentual).

a) **Estadística descriptiva**

La estadística descriptiva según la Universidad de San Carlos (USAC), es la rama de la estadística que se encarga de la recolección, agrupación y representación de los datos de una manera tal que se los describa fácil y rápidamente. Los datos se corresponden con el valor de la variable asociada a un elemento de una población o muestra, siendo las variables una característica de interés sobre cada elemento individual de la población que puede ser medida y recolectada en forma de número, palabra o símbolo.

- **Análisis descriptivo de datos**

El análisis descriptivo de datos se realiza mediante las medidas de tendencia centrales y las no centrales. La USAC describe las medidas de tendencia centrales como los indicadores usados para señalar que porcentaje de datos dentro de la distribución de frecuencias supera estas expresiones, cuyo valor presenta el valor del dato que se encuentra en el centro de la distribución de frecuencia. Dentro de los valores de tendencia central se tiene la media, la mediana y la moda.

En cuanto a las medidas de tendencia no central, el mismo autor señala que estas permiten conocer otros puntos característicos de la distribución que no son los valores centrales. Dentro de estos valores destacan los siguientes:

- Deciles: son diez valores que distribuyen la serie de datos, ordenada de forma creciente o decreciente en diez tramos iguales, en los que cada uno de ellos concentra el 10% de los resultados.
- Cuartiles: son 4 valores que distribuyen la serie de datos, ordenada de forma creciente o decreciente en cuatro tramos iguales, en los que cada uno de ellos concentra el 25% de los resultados.

- **Percentiles:** son 100 valores que distribuyen la serie de datos, ordenada de forma creciente o decreciente en cien tramos iguales, en los que cada uno de ellos concentra el 1% de los resultados.

1.4.3 Teorías del diseño de voladuras a cielo abierto

En esta sección se presentan las teorías para el cálculo del retiro, espaciamiento, taco, sobre perforación y distribución de carga explosiva por barreno.

1.4.3.1 Cálculo de retiro para voladuras en banco

El retiro representa un valor fundamental en el diseño de la voladura a cielo abierto. Por tal motivo, numerosos autores han desarrollado teorías de cálculo para dicho parámetro, los cuales se pueden observar de forma cronológica en la Tabla 2 Jimero & otros (2012.).

Tabla 2: Matriz de comparación de fórmulas de cálculo de retiro

AUTOR VARIABLES	A N D E R S E N	F R A N K E L	P P E R S E	H I N O	L A N G E F O R S	A S H	A L L S M A N	H A N S E N	U C A R	F O L D E S I	J I M E R O	K O N Y A
Diámetro del barreno	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Altura de banco								X	X			
Longitud del barreno	X	X										
Sobre-perforación		X						X	X			
Longitud de carga						X						
Inclinación del barreno					X							
Densidad de la roca						X					X	X
Resistencia de la roca		X	X	X						X		
Constantes de rocas	X		X		X							
Densidad del explosivo					X	X	X	X	X	X	X	
Velocidad de detonación						X				X	X	
Presión de detonación			X	X								
Relación retiro/espaciamiento					X							
Potencia del explosivo					X							

(Tomado de Jimero & otros 2012)

Langefors y Kijstrom 1963 son citados por Jimero & otros (2012) como los principales precursores del cálculo de retiro en voladura a cielo abierto, proponen una

ecuación que permite calcular el $B_{\text{máx}}$, a partir de parámetros geomecánicos de las rocas y propiedades de los explosivos, tal como se expresa en la Ecuación 16:

Ecuación 16: Retiro según Langefors

$$B_{\text{máx.}} = \frac{D}{33} \sqrt{\frac{dS * RWS}{C * F * (\frac{S}{B})}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

$B_{\text{máx.}}$: retiro máximo (m)

D: diámetro del barreno (mm)

dS: densidad del explosivo (g/cm^3)

RWS: potencia relativa en peso del explosivo

C: constante de roca

F: constante que depende de la inclinación de los barrenos, siendo $F=1$ para barrenos verticales, $F=0,90$ para barrenos inclinados 3:1 y $F=0,85$ para barrenos inclinados 2:1.

S: espaciamiento (m)

B: retiro (m)

Ucar en 1972 citado por Jimero & otros (2012), propone una fórmula diferente que depende solamente de concentración de carga lineal y de la altura de barreno, la cual se expresa en la Ecuación 17:

Ecuación 17: Retiro según Ucar

$$B_{\text{max}} = (1,5 * B^2 H) + (2B * q_1) - (3H * q_1) = 0 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

B: retiro (m)

H: altura del barreno (m)

q_1 : densidad de carga lineal en Kg/m^3 descrita en la Ecuación 18.

Ecuación 18: Carga lineal según Ucar

$$q_1 = d_e * \left(\frac{D}{36}\right)^2 \quad (\text{Ecuación 18})$$

Siendo:

d_e : densidad del explosivo (g/cm^3)

D: diámetro del barreno (mm)

Foldesi en 1980 citado por Jimero & otros (2012), propone una expresión para el retiro en función del diámetro del barreno, la densidad del explosivo, el factor de carga y una variable de corrección que depende a su vez de parámetros geomecánicos y de los explosivos, tal como se observa en la Ecuación 19.

Ecuación 19: Retiro según Foldesi

$$B = 0,88 * D * \sqrt{\frac{\rho}{m * CE}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

B: Retiro (m)

D: diámetro del barreno (mm)

ρ : densidad del explosivo en (kg/m³)

ce: consumo específico del explosivo (kg/m³)

m: variable de corrección que se calcula según la Ecuación 20

Ecuación 20: Parámetro m

$$m = 1 + \frac{0,693}{\ln(\rho * VD^2) - \ln RC - 1,39} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Siendo:

VD: velocidad de detonación del explosivo (m/s)

RC: resistencia a compresión de la roca (Mpa)

Jimero (1980), modifica la ecuación de Ash incorporando la velocidad sísmica del macizo rocoso, con lo cual resulta la Ecuación 21:

Ecuación 21: Retiro según López Jimero

$$B = 0,90 * 0,76 * D * F \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde:

B: Retiro (m)

D: diámetro del barreno (pulg)

F: factor de corrección en función de la clase de roca y tipo de explosivo, la cual se determina mediante las Ecuaciones 22, 23 y 24

Ecuación 22: Factor de corrección F

$$F = F_r + F_e \quad (\text{Ecuación 22})$$

Ecuación 23: Factor de corrección Fr

$$F_r = \left[\frac{2,7 * 3500}{\rho_r * VC} \right]^{0,33} \quad (\text{Ecuación 23})$$

Ecuación 24: Factor de corrección Fe

$$F_e = \left[\frac{\rho_e * VD^2}{1,3 * 3660^2} \right]^{0,33} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

VC: velocidad sísmica de propagación (m/s)

VD: velocidad de detonación del explosivo (m/s)

ρ_r : densidad de la roca (g/cm³)

ρ_e : densidad del explosivo (g/cm³)

De igual manera, Konya y Walter (1985) citados por Jimero & otros (2012), propusieron una ecuación que se basa en la densidad del explosivo, la densidad de la roca y el diámetro del barrenado, la cual viene expresada por la ecuación 25.

Ecuación 25: Retiro según Konya y Walter

$$B_c = \left(\frac{2d_s}{d_r} + 1,5 \right) * D \text{ (Ecuación 25)}$$

Donde:

- dS: densidad del explosivo (g/cm³)
- dR: densidad de la roca en (g/cm³)
- D: diámetro del barrenado (pulg)
- Bc: Retiro teórico (pies)

El valor de retiro teórico Bc no es totalmente exacto, ya que la carga exacta en un tipo de roca varía según la naturaleza de la geología. Incluso cuando las características de resistencia de la roca no varían, el modo de deposición de la roca y la estructura geológica también debe ser considerado en el diseño de voladura. Por tal motivo Konya y Walter, incorporan la heterogeneidad de la roca con el fin de dar un valor más práctico multiplicando la carga calculada por ciertos factores, como se muestra en la Ecuación 26.

Ecuación 26: Retiro práctico por Konya y Walter

$$B = B_c * K_e * K_s * K_r \text{ (Ecuación 26)}$$

Donde:

- B: retiro práctico (m)
- Bc: retiro teórico (m)
- K_e: corrección por disposición de la roca
- K_s: corrección por las estructuras presentes en la roca
- K_r: corrección por hileras

1.4.3.2 Cálculo del espaciamiento para voladuras en banco

Ash (1963) citado por Jimero & otros (2012), describe que el espaciamiento de la voladura se debe calcular en función del retiro y una constante de adecuación K, como lo muestra la Ecuación 27.

Ecuación 27: Espaciamiento según Ash

$$S = K * B \text{ (Ecuación 27)}$$

Donde:

S: espaciamiento (m)

B: retiro (m)

K: constante de adecuación donde $K=2$ para voladuras con iniciación simultánea, $K=1$ para barrenos secuenciados con mucho retardo y k entre 1,2 y 1,8 para barrenos secuenciados con pequeños retardos.

De igual manera Foldesi (1980), presenta el cálculo del espaciamiento en función de la constante “m” y el retiro, como lo muestra la Ecuación 28.

Ecuación 28: Espaciamiento según Foldesi

$$S = m * B \text{ (Ecuación 28)}$$

Donde:

S: espaciamiento (m)

B: retiro (m)

m: variable de corrección expresada en la Ecuación 20

1.4.3.3 Cálculo del taco para voladuras en banco

Konya (1998) describe que, en la mayoría de los casos, una distancia de 0,70 veces el retiro es adecuada para evitar que salga el material prematuramente del barreno. El autor reitera que la distancia del taco es proporcional al retiro y, por lo tanto, al diámetro de la carga, a la densidad del explosivo y a la densidad de la roca. Si la voladura posee un diseño deficiente, es posible que la relación propuesta no sea adecuada para confinar el volumen de gases de la voladura, es por esto que Konya señala que la distancia del taco planteada por él es válida solamente si la voladura está funcionando adecuadamente.

De igual manera, Konya hace referencia al efecto del material del taco sobre el resultado de la voladura, donde describe que el material más común utilizado para taco son las arcillas de barrenación, ya que se localizan convenientemente en la boca de los barrenos, sin embargo, las arcillas muy finas son un material muy pobre para el taco. Si se utilizan arcillas de barrenación que contengan demasiado polvo, se tendrá que utilizar aproximadamente una distancia de taco igual al retiro, para obtener el mismo efecto de contención de los gases, es por esta razón, que una práctica más apropiada es la de utilizar piedra triturada como material de taco.

La selección del tamaño del material de taco es importante, si se desea minimizar la profundidad de este, para poder romper la capa superior de roca, el polvo de barrenación muy fino no se mantendrá dentro del barreno y el material muy grueso tiene la tendencia a dejar huecos de aire cuando se vacía en el barreno, y puede ser expulsado como pelotas de *golf*. El tamaño óptimo del material será aquel que tenga un diámetro aproximado de 5% del diámetro del barreno. Dicho material debe tener aristas agudas para que, al momento de escapar los gases de la detonación, se traben entre si las rocas y generen un mejor efecto en la fragmentación del macizo.

1.4.3.4 Cálculo de sobre perforación para voladuras en banco

Konya (1998), reitera que la sobre perforación o sub-barrenación se utiliza comúnmente para definir la profundidad a la cual se perforara para asegurar que el rompimiento de la roca ocurra a nivel. El autor señala que en la mayoría de las labores de voladura se trabaja con sobre perforación, a menos que, por conciencia exista un estrato suave al nivel del piso. Si esto ocurre, no se utiliza la sobre perforación durante la labor. Konya señala que para determinar la sobre-perforación se debe utilizar la fórmula planteada en la Ecuación 29.

Ecuación 29: Sobre-perforación según Konya

$$J = 0,30 B \text{ (Ecuación: 29)}$$

Donde:

J: sobre perforación (m)

B: retiro (m)

Igualmente, Konya señala que la sobre-perforación no debe contener arcillas de barrenación, lodos o cualquier otro material rocoso. Si las paredes del barreno se derrumban y rellenan el barreno, la sobre perforación real deberá ser más profunda que la sobre perforación discutida previamente.

En tal sentido, se señala lo propuesto por Ash, donde la sobre perforación se calcula en función de una constante K que se encuentra entre 0,2 y 0,4, pudiendo adoptar los valores extremos en los casos antes mencionados por Konya, tal como se expresa en la Ecuación 30.

Ecuación 30: Sobre perforación por Ash

$$J = K * B \text{ (Ecuación 30)}$$

Donde:

J: sobre perforación (m)

B: retiro (m)

1.4.3.5 Cálculos de distribución de carga explosiva para voladuras en banco

Para el cálculo de la distribución de carga explosiva por barreno, Konya propone fórmulas para la concentración de carga lineal (q_f), expresada en la Ecuación 31, altura de carga de fondo (h_f), expresada en la Ecuación 32, altura de carga de columna (h_c), expresada en la Ecuación 33 y el factor de carga (FC), expresado en la Ecuación 34.

Ecuación 31: Concentración de carga lineal según Konya

$$Q_f = \frac{(\rho_{EXP} * (D_b)^2)}{1276} \text{ (Ecuación 31)}$$

Donde:

ρ_{exp} : densidad del explosivo (kg/cm^3)

D_b : diámetro del barreno (mm)

Q_f : concentración de carga lineal (kg/m)

Ecuación 32: Altura de cargada de fondo según Konya

$$H_f = 1,3 * B_{\text{máx.}} \text{ (Ecuación 32)}$$

Donde:

$B_{\text{máx.}}$: retiro máximo, calculado por Langefors, Konya o Ucar. (m)

H_f : altura de carga de fondo (m)

Ecuación 33: Altura de cargada de columna según Konya

$$H_c = L_b - T - S_p - H_f \text{ (Ecuación 33)}$$

Donde:

L_b : longitud del barreno (m)

T: taco (m)

S_p : sobre perforación (m)

H_f : altura de carga de fondo (m)

H_c : altura de carga de columna (m)

Ecuación 34: Factor de carga según Konya

$$F_c = \frac{(q_f * h_f) + (q_c * h_c)}{B * S * H} \text{ (Ecuación 34)}$$

Donde:

q_f : concentración de carga de fondo (kg/m)
 h_f : altura de carga de fondo (m)
 q_c : concentración de carga de columna (kg/m)
 h_c : altura de carga de columna (m)
B: retiro (m)
S: espaciamiento (m)
H: altura del barreno (m)

1.4.4 Buenas prácticas en la evaluación del resultado de las voladuras

Jimero & otros (2012), señala que una vez ejecutada una voladura, es necesario proceder a analizar los resultados obtenidos, ya que su interpretación permitirá introducir modificaciones sucesivas en los parámetros de diseño de las siguientes operaciones, constituyendo esta una etapa fundamental en cualquier proceso de optimización de dicha operación. El autor señala que para realizar una evaluación global de la voladura se deben considerar los siguientes aspectos, de los cuales serán tomados la fragmentación y el esponjamiento como los más importantes para la investigación.

- Fragmentación y esponjamiento de la pila de escombros
- Geometría de la pila, altura y desplazamiento
- Estado del macizo residual y piso del banco
- Presencia de sobretamaños en la pila
- Vibraciones, proyecciones y onda aéreas

1.4.4.1 Fragmentación y esponjamiento de la pila de escombros

Además de la clasificación granulométrica del material en plantas de trituración, no existe ningún método que haga posible evaluar cuantitativamente la fragmentación en condiciones apropiadas (Jimero & otros 2012). La distribución granulométrica constituye la herramienta básica dentro del proceso de optimización de las voladuras, ya que es el único medio de comparación de la fragmentación obtenida cuando se procede a realizar un estudio de sensibilidad de los parámetros de diseño.

Para llevar a cabo la evaluación granulométrica de la voladura, Contreras & otros (2010) resumen los métodos de evaluación de granulometría post-voladura de la siguiente manera:

- Análisis cuantitativo visual: es un método ampliamente utilizado y en algunos casos el único que se ocupa, el cual consiste en observar la tronadura inmediatamente después de efectuado el disparo. El procedimiento lo realiza un técnico responsable mediante una evaluación subjetiva; sin embargo, este método no permite apreciar cambios muy acuciosos, y sólo permite tener un primer contacto con los resultados de la voladura que proporcionen un posterior estudio en profundidad de ella.
- Métodos fotográficos: es un método en el cual se toman fotografías de la pila, sobre la cual se eligen aleatoriamente unas zonas equivalentes al 15% de la superficie total. El sistema es uno de los más útiles y, además proporciona una documentación gráfica para el análisis y comparación de diferentes trabajos. Los únicos inconvenientes de este método vienen dados por el tiempo de preparación, estudio y la cuantificación de los finos.
- Métodos gravimétricos: los métodos gravimétricos aportan una precisión mayor que los de fotografía convencional, pero dado el alto costo de inversión de los equipos y accesorios, su empleo es sólo un complemento de las aplicaciones principales, las cuales son el control topográfico de la explotación en los tajos y excavaciones entre otros. Las ventajas de este estudio es que permite el estudio tridimensional de la pila de escombros, pudiendo calcularse el tamaño de cada fragmento, el volumen y el esponjamiento de la pila.
- Método de análisis granulométrico por análisis fotográfico digital: los autores presentan el análisis granulométrico por medio de análisis digital de fotografías como una de las técnicas más usadas en la actualidad, para lo cual el autor señala el siguiente método de análisis:
 - Captación de la imagen: La imagen es captada por medio de una cámara, generalmente de video, y sometida a un proceso de digitalización automática. Esto supone una conversión de la imagen óptica a un formato digital en forma de matriz de puntos elementales “pictures point pixels (ppp)”, a los que se les hace corresponder una determinada luminosidad, o valor de gris, desde negro hasta blanco (255 colores).
 - Cambio de escala: se define la imagen de la escala, normalmente, aprovechando un estilo de referencia colocado sobre la pila de escombros.
 - Intensificación de la imagen: En esta etapa se utilizan filtros digitales que permiten obtener una imagen de los fragmentos resaltada.

- Segmentación de la imagen: En esta etapa los fragmentos son separados del resto del fondo para producir una imagen binaria (blanco y negro). Para ello, se define un nivel de gris, los píxeles con valores sobre dicho nivel se harán blancos (fragmentos), y se tendrán en cuenta, mientras que los que estén por debajo serán más oscuros (fondos) y se convertirán en negro.
- Manipulación de la imagen binaria: El proceso de segmentación nunca es perfecto, ya que los contornos de algunos fragmentos se cruzarán y otros se habrán ocultado en el fondo. Para efectuar las correcciones se aplica un proceso iterativo de digitalización, adelgazamiento y eliminación de líneas.
- Medida: El sistema, después de identificar cada objeto en la imagen binaria como un objeto independiente, mide el diámetro en un poliedro de área equivalente y clasifica.
- Interpretación estereométrica: En esta etapa la distribución de los tamaños con dos dimensiones se transforma en una distribución de los tamaños volumétricos o tridimensionales. Esta conversión exige la aplicación de los principios estereométricos y el uso de algunas relaciones empíricas.

Adicionalmente a esta clasificación, Jimero & otros (2012), presenta diferentes alternativas a las señaladas por Contreras & otros (2010), las cuales se describen a continuación:

- Estudio de la producción del equipo de carga: esta técnica de evaluación basa su estudio en el rendimiento de las unidades de carga, asumiendo que el rendimiento de estas unidades es una función inversa de la granulometría del material y función directa del esponjamiento del mismo.
- Volumen de material que requiere fragmentación secundaria: los fragmentos de roca producidos en la voladura que no puedan ser manipulados o admitidos en la entrada de la trituradora primaria serán considerados como sobretamaños. Las dimensiones de estos bloques dependen de cada operación y durante el desarrollo de la misma deberán ser apartados para proceder con las operaciones.
- Producción del primario: la producción de cualquier trituradora primaria depende fundamentalmente de la granulometría de la mina, por lo que puede obtenerse indirectamente un índice de la fragmentación a partir de los rendimientos del equipo y del consumo de energía por tonelada tratada.

1.4.4.2 Esquema de optimización económica de la perforación y voladura

La optimización de los costos de la operación unitaria de arranque por voladura, puede llevarse a cabo aplicando la ingeniería de sistemas a la creación de un modelo global de optimización que toma como base la información referente a las características del macizo rocoso; propiedades de los explosivos; y la información técnico económica de los equipos de perforación, carga, transporte y trituración (Jimero & otros 2012).

Tras los cálculos de los esquemas de perforación y carga de barrenos debe procederse a la predicción de la fragmentación y la simulación de las operaciones de carga, transporte y trituración, determinando los rendimientos y costos unitarios de cada una de ellas. A continuación, se presenta un análisis de sensibilidad con el fin de calcular de forma teórica la fragmentación óptima, evaluándose en la práctica los beneficios del sistema, contrastando los datos teóricos con la realidad. Este procedimiento se representa de forma gráfica en la Figura 10.

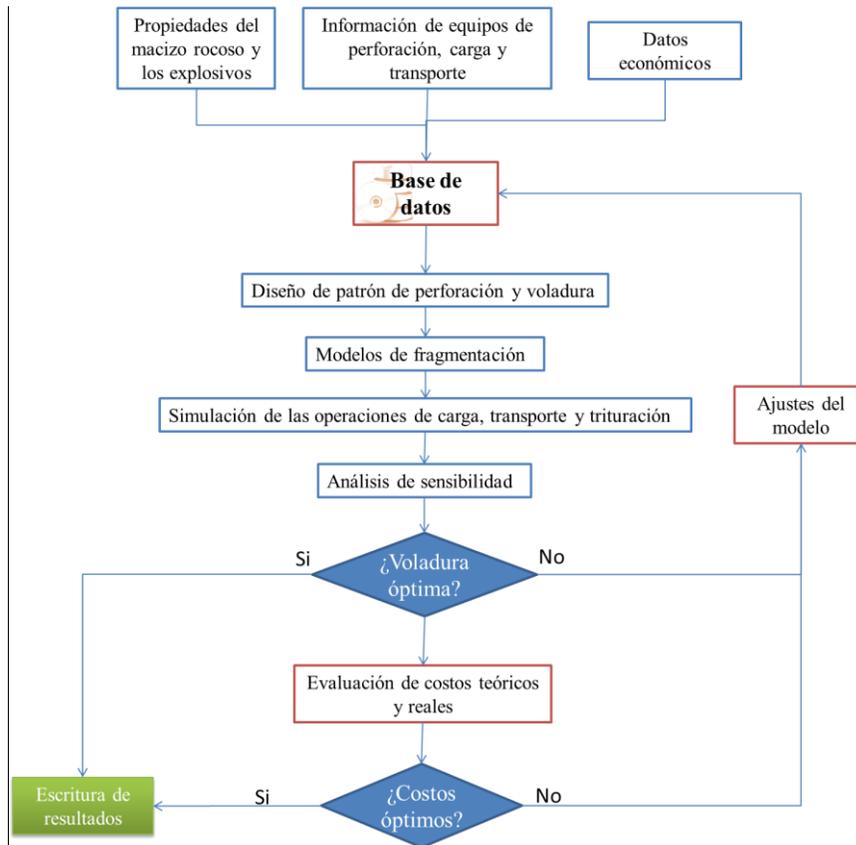


Figura 10: Esquema determinista de optimización económica de la perforación y voladura
(tomada y editada de Jimero & otros 2012)

1.4.5 Términos fundamentales para la investigación

En esta sección se presentan aquellos términos fundamentales en la investigación, donde destacan las definiciones referentes a explosivos y sus propiedades, las variables controlables y no controlables de la voladura y por último, conceptos fundamentales de la estadística descriptiva.

1.4.5.1 Explosivos

Los explosivos pueden definirse como “compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que lleva a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones”. (Exsa, 2002)

1.4.5.2 Propiedades de los explosivos

Las propiedades de los explosivos son mencionadas por los autores Bernaola & otros (2013), las cuales se resumen a continuación:

- Potencia explosiva: capacidad que posee el explosivo para quebrantar y proyectar la roca. Esta característica depende fundamentalmente de la composición de explosivo, pudiendo optimizarse con la adecuada técnica de voladura. Existen diferentes métodos para valorar la potencia de un explosivo, siendo uno de los métodos más utilizados la Energía Relativa por unidad de Peso (RWS) y de Volumen (RBS).
- Velocidad de detonación: velocidad a la que se produce la transformación de una columna explosiva de un estado sólido a un estado gaseoso, produciendo aumentos de presión y temperatura en un espacio confinado. “ Se optará por explosivos que detonan lentamente, cuando se vuelen rocas blandas o se requiera una fragmentacion gruesa, mientras que se debe escoger explosivos dotados de elevada velocidad de detonación cuando se pretenda fragmentaciones mas intensas en rocas duras”.

- Densidad: hace referencia a los gramos por cm cúbico (g/cm^3) que tiene el explosivo en un espacio confinado.
- Diámetro crítico: diámetro de una carga cilíndrica por debajo del cual la onda de detonación no se propaga o lo hace a una velocidad muy inferior a la nominal.
- Masa crítica: mínima cantidad de explosivo que se necesita para que se produzca la detonación por efecto de una llama.
- Resistencia al agua: característica por la cual un explosivo, sin necesidad de cubierta especial, mantiene sus propiedades inalterables durante un período de tiempo en contacto con el agua.
- Calidad de los humos: los humos de la detonación son productos gaseosos resultantes de la reacción de detonación del explosivo entre los que destacan los siguientes componentes: vapores nitrosos (NO_x), vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO_2).
- Toxicidad: hace referencia a las consecuencias de estar expuesto a los componentes del material explosivo durante su manipulación.
- Sensibilidad: energía de iniciación que hay que transmitirle para que se produzca su iniciación y detonación. Se pueden considerar diferentes aspectos relativos a la sensibilidad de los explosivos, unas afectan a la seguridad en la manipulación (fabricación, transporte y utilización) y otras a su iniciación en la voladura.
- Estabilidad química: aptitud para mantenerse químicamente inalterado con el paso del tiempo. La estabilidad está garantizada si las condiciones y el período de almacenamiento son los adecuados y correctos, permitiendo al usuario tener un producto totalmente seguro y fiable para los trabajos de voladura.

1.4.5.3 Variables controlables de una voladura

Algunas de las variables controlables de mayor relevancia para el diseño de voladuras en banco son definidas por Jimero & otros 2012, las cuales se presentan a continuación:

- Retiro: distancia más corta a la cara libre, en una malla de perforación, esta variable depende del diámetro de la perforación, de las propiedades de la roca, de los explosivos a utilizar, de la altura del banco y el grado de fragmentación y desplazamiento del material deseado. Los valores del retiro se encuentran entre 25 y 40 veces el diámetro, dependiendo fundamentalmente del macizo rocoso. Valores menores o mayores con respecto al teórico previsto pueden darse en las siguientes situaciones:

- Error de posicionamiento o replanteo del barreno.
- Falta de paralelismo entre el barreno y la cara del banco.
- Desviaciones del barreno durante la perforación.
- Irregularidades en el frente del talud.

Si el retiro es excesivo, los gases de explosión encuentran mucha resistencia para agrietar y desplazar la roca y parte de la energía se transforma en energía sísmica aumentando la intensidad de las vibraciones.

- Altura de banco: corresponde a la cota topográfica definida por los estudios geotécnicos.
- Longitud del barreno: longitud de perforación realizada en el área a volar definida por la altura del banco.
- Área a volar: denominación que recibe el sector previamente seleccionado para ser volado.
- Malla de perforación: representa la disposición de los barrenos en el terreno definida por el retiro y el espaciamiento.
- Diámetro del barreno: está definido por el diámetro de la broca de perforación, diseñado según las características del macizo rocoso, el grado de fragmentación deseado, la altura del banco, configuración de las cargas y por el equipo de perforación seleccionado.
- Espaciamiento: distancia más larga entre barrenos de una misma fila en una malla de perforación, así como en el cálculo del retiro, esta variable depende del retiro y se calcula en función al retiro, el tiempo de retardo de los barrenos y entre barrenos y de la secuencia de encendido. Espaciamientos pequeños producen entre las cargas un exceso de trituración y roturas superficiales en cráter, bloques de gran tamaño por delante de la fila de barrenos y problemas de repiés.
- Retacado: volumen del barreno relleno de material inerte generalmente en superficie y que está definido por la relación de carga del barreno y el diámetro del mismo, por regla general al aumentar el diámetro del barreno, aumenta el retacado. Tiene la misión de confinar y retener los gases producidos durante la explosión para permitir que se desarrolle por completo el proceso de fragmentación de la roca. Si este es insuficiente se produce un escape prematuro de los gases generando problemas de onda aérea y riesgo de proyecciones, si este es excesivo se obtienen grandes cantidades de bloques, poco esponjamiento de la pila de material y altos niveles de vibración.
- Sobre-perforación: es la longitud del barreno por debajo del nivel del piso que se necesita para romper la roca a la altura del banco y lograr una fragmentación y desplazamiento adecuado.

1.4.5.4 Variables no controlables de una voladura

Las “variables no controlables” se pueden definir como todos aquellos factores que no son posibles controlar durante el diseño y ejecución de la operación unitaria de perforación y voladura (Utches, 2014). Las experiencias de campo, permiten observar cómo estas variables no controlables actúan constantemente en las labores de planificación y ejecución de la voladura, dentro de las cuales se puede mencionar las siguientes:

- Errores humanos: los errores humanos son un punto a tomar en cuenta en toda operación que no se realice de manera automatizada, los errores humanos se atribuyen básicamente a muchos factores, tales como: factores psicológicos, como el estado de ánimo y la motivación; factores físicos como la presencia de una dolencia o malestar durante las labores de trabajo, deshidratación, cansancio e insolación; y por último, factores relacionados con el conocimiento técnico que tenga el personal sobre las labores que desempeña.
- Geología: los materiales que componen a un macizo rocoso poseen ciertas características físicas que son función de su origen y de los procesos geológicos posteriores que sobre ellos han actuado. El conjunto de estos fenómenos geológicos conduce en un determinado entorno, a unas características litológicas muy particulares. Son estas características litológicas particulares las que determinan las operaciones de planificación y ejecución en una voladura, dentro de las cuales se encuentra:
 - Presencia de agua: la presencia de agua en el macizo rocoso se produce mayormente en rocas porosas o fracturadas que permiten que se produzca un flujo de agua. Este flujo de aguas presenta problemas en la selección de los explosivos, en vista que obliga a seleccionar explosivos que no son alterados por el agua, igualmente, afecta a los barrenos, debido a que produce hundimientos internos, que ocasiona la pérdida de los mismos.
 - Presencia de fracturas: todas las rocas en la naturaleza presentan algún tipo de discontinuidad, micro fisuras y macro fisuras, que influyen de manera decisiva en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas y, consecuentemente, en los resultados de las voladuras. Las superficies de discontinuidad o fractura pueden presentarse en forma de planos de laminación, planos de estratificación, juntas y fracturas producidas por efectos mecánicos de voladuras previas.

- Clima: el clima se encuentra afectado por factores como la latitud, el relieve, la cercanía al mar, la altitud, la vegetación, cambios atmosféricos, entre otros. Al depender de tantos factores, el clima de una determinada región, puede cambiar drásticamente en pequeñas extensiones de terreno, lo cual lo convierte en una variable impredecible. El clima puede favorecer o afectar en gran medida las labores de voladura, de tal manera que climas con nubosidad moderada, baja humedad y vientos de baja velocidad, pueden generar mayor eficiencia en el trabajo, sin embargo, climas de mucha lluvia, alta humedad o vientos de alta velocidad, afectan tanto a las propiedades de los explosivos sensibles al agua, como a la eficiencia y seguridad de los trabajadores.

1.4.6 Programas para el desarrollo de la investigación

En el desarrollo de la presente investigación se emplean diferentes programas tales para: Edición fotográfica: *Inkscape*, Análisis granulométrico: *ImageJ* y Compilación: *Lazarus*.

1.4.6.1 Software libre de edición fotográfica *Inkscape*

Inkscape es un editor de gráficos vectoriales gratuito y de código libre. *Inkscape* puede crear y editar diagramas, líneas, gráficos, logotipos, e ilustraciones complejas. El formato principal que utiliza el programa es Scalable Vector Graphics (SVG) versión 1.1. (INKSCAPE, 2016)

Inkscape tiene como objetivo proporcionar a los usuarios una herramienta libre de código abierto de elaboración de gráficos en formato vectorial escalable (SVG) que cumpla completamente con los estándares XML, SVG y CSS2. (INKSCAPE, 2016)

1.4.6.2 Software libre de análisis granulométrico *ImageJ*

ImageJ es una aplicación de procesamiento de imágenes creada en java con dominio público funcional como un subprograma en línea o como una aplicación descargable para *Windows*, *Mac* y *Linux*. Con esta aplicación se puede visualizar, editar, analizar, procesar, guardar e imprimir, imágenes de 8, 16 y 32 bits, en formatos como tiff, gif, jpeg, bmp, dicom, fits, entre otros. Igualmente, se logra calcular estadísticas de las zonas gráficas y el valor en píxel de selecciones definidas por el usuario. Puede medir distancias, ángulos y crear histogramas de densidad. Es

compatible con las funciones de procesamiento de imágenes estándar, como la manipulación de contraste, la nitidez, el suavizado, la detección de bordes y la mediana de filtrado. (ImageJ, 2016)

1.4.6.3 Programa de compilación (*Lazarus*)

Lazarus es una herramienta de desarrollo rápido de aplicaciones (RAD) basada en el lenguaje de programación *Object Pascal*, disponible para los sistemas operativos *Windows*, *GNU/Linux* y *Mac OS X*.

Se trata de una alternativa libre y gratuita a Delphi, desarrollada como proyecto de software libre a partir de *Free Pascal*. La web y la mayoría de la documentación están en inglés, pero el entorno de desarrollo (IDE) sí está traducido al español en gran parte. (Lazarus, 2016)

1.4.6.4 Definiciones Adicionales

En la siguiente sección, se presentan algunos términos complementarios usados en el desarrollo de la investigación y necesarios para su comprensión.

a) Error absoluto

El error absoluto de una medida (ϵ_a) es la diferencia entre el valor real de la medida (X) y el valor que se ha obtenido en la medición (X_i). El error absoluto puede ser un valor positivo o negativo, según si la medida es superior al valor real o inferior y además tiene las mismas unidades que las de la medida. (Fisicalab, 2016)

b) Error relativo

Es el cociente entre el error absoluto y el valor que consideramos como exacto (la media). Al igual que el error absoluto puede ser positivo o negativo porque puede producirse por exceso o por defecto y al contrario que él no viene acompañado de unidades. (Fisicalab, 2016)

c) *Scheme*

Proveniente de la palabra inglesa *scheme*, cuya traducción significa esquema, plan o proyecto. Esta palabra es utilizada por los autores del presente trabajo, para hacer

referencia a un conjunto de variables que componen un diseño de voladura, como retiro, espaciamiento, taco, longitud del barreno, factor de carga, tamaño medio de fragmentación, entre otras.

d) Emulsión

La emulsión es un explosivo tipo E, robusto, de alto poder, encartuchado, en base a nitrato de amonio, resistente al agua (Orica, 2014) es importado a Venezuela por la empresa Orica y se encuentra en el mercado con las siguientes presentaciones:

Tabla 3: Presentaciones de emulsión Orica Venezuela

Diámetro (mm)	Largo nominal (mm)	Masa nominal (g)	Piezas por caja
25	200	120-130	200
32	200	185-195	131
40	200	260-270	94
40	400	580-590	43
65	400	1460-1480	17
75	400	2060-2080	12
115	400	4800-5000	5

(Tomado de Orica Venezuela)

e) ANFO

El ANFO es un agente de voladura tipo B, compuesto principalmente de Nitrato de Amonio y *Fuel Oil*, fabricado en forma de micro cápsulas y comercializado en forma de sacos de 20 kg (Orica, 2014), importado a Venezuela por Orica.

2 CAPÍTULO II: MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

Esta sección de constituye por el tipo y diseño de la investigación, selección de los frentes de estudio, técnicas e instrumentos de recolección de información en campo, validez y confiabilidad del instrumento, así como, las fases de la investigación con su respectivo diagrama de flujo donde se especifican las tareas para el logro de los objetivos de la investigación.

2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es de tipo proyectivo, el cual es propuesto por Hurtado, J. (2015), para solucionar una situación determinada a partir de un proceso de indagación. Implica explorar, describir, explicar y proponer alternativas de cambio, mas no necesariamente ejecutar la propuesta. De igual forma, Hurtado señala que todas las investigaciones que implican el diseño o creación de algo con base en un proceso investigativo, entran de igual forma dentro del tipo de investigación proyectiva.

2.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación se cataloga según la teoría de Hurtado, J. (2015), como un diseño de fuente mixta transeccional contemporáneo. Es de fuente mixta porque el origen de la información recolectada es de tipo documental, para la investigación de las bases teóricas, y de campo, para la recolección de información en el sujeto de estudio. Es transeccional debido a que la información se recolecta en un sólo punto del tiempo, y contemporánea porque es realizada en tiempo presente.

2.3 Selección de los sujetos de estudio

Los sujetos de estudio se obtienen mediante la selección intencionada de cuatro procesos de perforación y voladura bajo los siguientes criterios de selección: exclusivamente en canteras de materiales no metálicos, dedicadas a la producción de agregados o materiales ornamentales y además, donde los procesos de perforación y voladuras se realizaran con fines de producción o apertura de nuevas áreas de explotación.

2.4 Técnica e instrumento de recolección de información

Las técnicas tienen que ver con los procedimientos utilizados para la recolección de los datos, es decir, el cómo. Existen diferentes técnicas, entre las cuales se seleccionó para esta investigación la observación, la cual consiste en el registro sistemático, válido y confiable de un fenómeno o situación manifiesta. La observación posee la cualidad ventajosa de ser una técnica de medición no obstructiva, donde se puede trabajar con grandes volúmenes de datos y con instrumentos que permiten la obtención de los datos de la realidad.

En lo que respecta a los instrumentos, estos representan la herramienta con la cual se va a recoger, filtrar y codificar la información, es decir, el con qué. Existe diferentes instrumentos de recolección de información, entre ellos se seleccionó elaborar una Guía de Observación.

2.4.1 Guía de observación

La guía de observación para Rojas (2002), es un conjunto de preguntas elaboradas con base en ciertos objetivos e hipótesis y formuladas correctamente a fin de orientar la observación. Este instrumento permite registrar los datos con un orden cronológico, práctico y concreto, para derivar de ellos el análisis de una situación o problema determinado.

En relación a la elaboración de las preguntas de una guía de observación, éstas pueden ser tan variadas como los aspectos que mida y básicamente se establecen dos tipos de preguntas: cerradas y abiertas. Las preguntas cerradas contienen categorías o alternativas de respuesta que han sido delimitadas. Pueden ser dicotómicas (dos alternativas de respuesta) o incluir varias alternativas de respuesta. En cambio, las preguntas abiertas no delimitan de antemano las alternativas de respuesta.

Para efecto de esta investigación se elaboraron dos guías de observación: una denominada Guía de Observación día de Voladura y la otra, Guía de Observación para el control.

2.5 Validez y confiabilidad de los instrumentos

La validez está vinculada a la exactitud con que pueden efectuarse medidas de interés y con la que son adecuadas mediante un instrumento a los propósitos de un estudio; la validez se refiere al grado en que un instrumento realmente mide el rasgo, características o variables que pretende medir. Existen distintos tipos de validez, de las cuales se seleccionó para esta investigación: la validez de contenido, referida a la determinación, hasta donde los ítems, preguntas, reactivos, enunciados o proposiciones de un instrumento son representativos del dominio o universo del contenido del aspecto, característica, variable o propiedad que desea medir.

Este tipo de validez se expresa mediante Juicio de Expertos, en el cual se seleccionan no menos de tres expertos para que estimen de manera independiente, la adecuación o ajuste de los ítems del instrumento en términos de: coherencia con los objetivos de investigación, relevancia o congruencia, claridad de la redacción, formato utilizado y sesgo en la formulación de los reactivos. Dichos expertos son seleccionados tomando como criterio una experiencia de al menos 10 años en las áreas de: minería a cielo abierto, perforación, voladura de rocas, planificación minera y extracción de materiales no metálicos.

2.6 Fases de la Investigación

Para el desarrollo de la presente investigación se elaboró un Diagrama de flujo, el cual contiene cinco fases con su respectiva descripción de tareas y el método de validación del ImageJ.

2.6.1 Diagrama de flujo de la investigación

El diagrama de flujo de la investigación representa las tareas realizadas para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos. Es por esto, que cada objetivo específico es tratado durante el desarrollo de la investigación como una fase, lo cual genera cinco fases denominadas como:

- Fase 1: Formulación de los instrumentos que permiten la recolección de información.
- Fase 2: Aplicación de los instrumentos en campo mediante el uso de guías de observación.
- Fase 3: Planteamiento de los algoritmos necesarios para el diseño de voladuras en canteras.
- Fase 4: Diseño de la interfaz de usuario.
- Fase 5: Verificación de los resultados obtenidos.

Con la finalidad de comprender las tareas principales de cada fase de investigación, y a su vez mostrar la interrelación entre cada fase a lo largo del desarrollo de la misma, se presenta en la Figura 10 el Diagrama de flujo de la investigación.

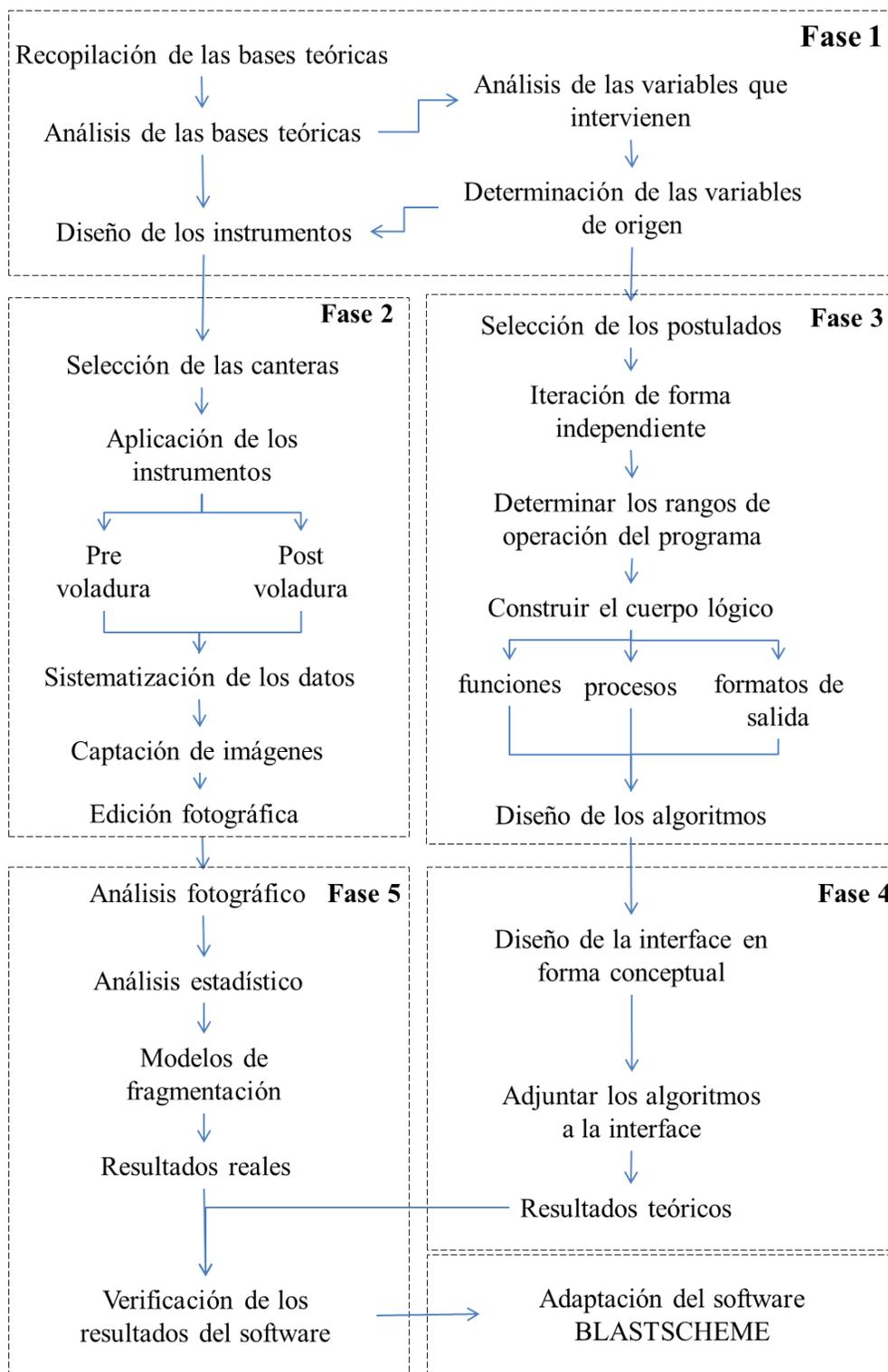


Figura 10: método para la investigación propuesto por los investigadores (Elaboración propia)

2.6.2 Descripción de las Fases de la investigación

En las fases de la investigación representadas en el Diagrama de flujo de la Figura 10, están descritas y detalladas las actividades que se siguieron en cada fase del proceso de investigación:

2.6.2.1 Fase 1: Formulación de los instrumentos

La formulación de los instrumentos comprende las tareas fundamentales de análisis de los basamentos teóricos y el diseño de las guías de observación que permiten la recolección de información en campo, para lo cual se presentan seguidamente los pasos correspondientes a cada tarea:

- El Análisis de las bases teóricas sigue los pasos:
 - I. Recopilar las teorías fundamentales de la investigación: la recopilación se centra en las temáticas relacionadas con la Investigación de Operación como método de optimización de procesos, las variables controlables de diseño de voladura, los mecanismos de fragmentación que actúan en la voladura, los modelos predictivos de fragmentación y los métodos de evaluación de resultados post-voladura.
 - II. Desglosar las teorías en las variables de origen: conocido los postulados que permiten diseñar y modelar una voladura en cantera, se procede a identificar las variables fundamentales que son consideradas en cada postulado teórico.
 - III. Comparar las teorías a modo de identificar las variables comunes: consiste en reescribir las variables de origen en forma de tablas que permitan observar la interrelación entre postulados.
 - IV. Establecer un criterio: se determinó un criterio que permita discriminar las variables que puedan o no ser medidas en campo con los recursos disponibles.
 - V. Discriminación de variables: con esto se busca utilizar el criterio de discriminación anterior con la finalidad de no incorporar variables desconocidas o de difícil medición durante los análisis y diseños posteriores, esto con la finalidad de incorporar variables que sean del conocimiento y fácil determinación durante la recolección de información en campo.

- VI. Reescribir los postulados en forma de pasos (algoritmo): consiste en reescribir los postulados en forma de simples pasos, de tal manera que sea posible su conversión a códigos de programación, para iterarlos a fin de conocer el comportamiento del postulado ante la alteración de una de sus variables.
- VII. Graficar el resultado de los algoritmos: se realizaron gráficas que permitieron observar la variación de los postulados ante la modificación de cada una de sus variables de origen, con la finalidad de conocer que variables poseen más peso dentro del postulado.
- Diseño de los instrumentos: el diseño de los instrumentos se fue realizado siguiendo los siguientes pasos:
 - I. Sistematizar las variables de interés: se sistematizaron las variables ya discriminadas por medio de su representación en forma de tabla, donde a cada variable se le asigna una nomenclatura que la identificó durante el desarrollo de los algoritmos.
 - II. Diseñar las guías de observación: en base a las variables de interés sistematizadas, los autores diseñan la guía de observación preliminar.
 - III. Prueba de las guías de observación: se asiste a una voladura con la guía de observación preliminar y posteriormente se analizaron las ventajas y desventajas de la guía, así como las fallas u omisiones que se cometieron durante su aplicación.
 - IV. Ajustar las guías de observación: en base a las observaciones de campo, se procede a rediseñar, ajustar o incorporar aspectos en las variables de origen.
 - V. Elaborar instrumento de validación: es instrumento para la validación a juicio de expertos de la guía de observación.
 - VI. Validación: es el juicio de tres expertos en el área de minería, los cuales emitieron juicios de valor sobre la coherencia, consistencia y pertinencia de cada uno de los ítems plasmados en la guía de observación.
 - VII. Ajustes de las Guías: en base a las observaciones, se ajustó los cambios pertinentes. Este instrumento de validación se puede observar en el Anexo 2.

2.6.3 Fase 2: Aplicación de la guía de observación en campo

La aplicación de las guías de observación, cumple el objetivo de recolectar la información necesaria, para modelar el resultado de la voladura en forma teórica por

medio del *software* adaptado a la operación en canteras, y de igual manera, evaluar el resultado del proceso de voladura.

En cuanto a la recolección de información de las variables de origen necesarias para los modelos teóricos, se plantea el siguiente método para la aplicación de la guía de observación previa a la voladura:

- I. Registro fotográfico del frente de trabajo: se realizó un registro fotográfico de 360° en toda la zona de trabajo, con el objetivo de observar la estabilidad del piso de trabajo, presencia de sobretamaños de voladuras previas, el estado de la cara libre, la distribución de las perforaciones, estructuras geológicas predominantes y cualquier factor que fuese relevante para la investigación.
- II. Medición de variables cuantitativas: las variables cuantitativas fueron suministradas por el ingeniero responsable de la operación.
- III. Medición de variables no controlables o cualitativas: las variables de orden cualitativo se recolectaron por medio de la observación en campo, registro fotográfico y la entrevista con el profesional responsable de las operaciones de perforación y voladura.
- IV. Dibujo de croquis de la perforación: el croquis de la perforación se realiza directamente en campo, señalando de forma generalizada la longitud de los barrenos en el área de trabajo, la ubicación de la cara libre, número de fila y columnas, el patrón de perforación y posibles errores o inconvenientes de perforación.
- V. Identificación de sub sectores de análisis: se identificaron subsectores del frente de trabajo en función de las condiciones que presentara cada sector, se determinó un subsector cuando ocurre una variación en la profundidad de la perforación o las condiciones del mallado.
- VI. Descripción de los subsectores: cada subsector identificado se describió detalladamente señalando las características de los barrenos del subsector.

En cuanto a la evaluación del resultado de la voladura, el criterio de evaluación los parámetros de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento de la pila de escombros, el estado del macizo residual y piso del banco y la presencia de sobretamaños en la pila de material.

Para lograr la evaluación de dichos parámetros se utilizó el análisis cuantitativo visual y los métodos de análisis de imagen por computador.

En cuanto al registro fotográfico post-voladura, fue efectuado inmediatamente después de la detonación, para lo cual se sigue el siguiente método de captación de la imagen:

- I. Selección del área de registro: del área total de la voladura, se captaron imágenes representativas de cada subsector determinado anteriormente, para lo cual se captaron un mínimo de 3 imágenes por subsector.
- II. Ángulo de la fotografía: la fotografía se tomó lo más perpendicular posible a la pila de rocas, para lo cual fue necesario ubicarse en un punto superior de la pila.
- III. Iluminación de la fotografía: la iluminación de la fotografía fue igualmente, lo más perpendicular posible a la pila, por lo cual se recomienda hacer la captura en horas del mediodía, con la finalidad de minimizar el efecto de las sombras en el análisis.
- IV. Uso de la escala: la escala se determina usando como referencia un balón de fútbol sala #3 marca Tamanaco con un diámetro de 15 cm. Al usar una escala representada por un objeto esférico, se elimina el efecto de la perspectiva sobre el valor de la escala, lo cual permite tomar la misma fotografía desde diferentes ángulos.
- V. Toma de fotografías desde diferentes perspectivas: se capturan un mínimo de tres tomas fotográficas desde diferentes perspectivas en un mismo punto de la voladura, esto con la finalidad de obtener diferentes visuales de la misma distribución y posteriormente en oficina seleccionar la que mejor representara la distribución en la zona.

Posterior a la captación de la imagen, se siguió el método expuesto por Contreras (2010), para el análisis granulométrico por medio de análisis digital de fotografía, el cual siguió los pasos a continuación:

- I. Intensificación de la imagen.
- II. Segmentación de la imagen.
- III. Manipulación de la imagen binaria.
- IV. Medida.
- V. Interpretación estereométrica.

Los pasos I, II y III, se realizaron mediante el *software* libre *Inkscape*. Adicionalmente para los pasos IV y V, se utilizó el *software* de código libre especializado en análisis granulométrico *ImageJ*.

2.6.4 Fase 3: Planteamiento de los algoritmos

El planteamiento de los algoritmos base para las funciones y procesos se genera según el siguiente método:

- I. Escoger las teorías a emplear en los algoritmos: en base al análisis teórico de los modelos y postulados de voladura, se escoge una selección de las teorías que representaran un mejor comportamiento para su incorporación dentro del *software*.
- II. Identificar las variables que intervienen en los algoritmos: en función de la sistematización de las variables propuesta en la Fase 1, se procede a identificar el tipo de variable con la cual operasen los algoritmos de funcionamiento.
- III. Delimitar el rango de valores de cada variable: la construcción de algoritmos requirió en su mayoría procesos cíclicos de cálculo. Por lo cual se determinó el rango de valores que pudo adquirir cada variable que se vio involucrada dentro de un ciclo. Estos rangos de valores se tomaron de las iteraciones de los postulados propuestos en la Fase 1.

2.6.5 Fase 4: Diseño de la interface

El diseño de la interface estuvo dividido en tres etapas, las cuales son:

- I. Diseño del esquema de la interface: se establece la configuración de los elementos que son mostrados en la interface, así como las propiedades visuales de los mismos.
- II. Creación de la interface: etapa en la que se adaptan y crean los formularios de la interface de acuerdo al diseño previamente propuesto.
- III. Programación de los eventos de los formularios: fase en la que se incluye a la interface el código del programa proveniente de los algoritmos planteados, a manera de que el programa ejecutara sus acciones según el evento que fuese llamado.

2.6.6 Fase 5: Verificación de los resultados obtenidos mediante el *software*.

La verificación de los resultados obtenidos mediante el *software* se obtiene a través de la aplicación del *Software BlastScheme* en la comparación de los resultados teóricos y reales basados en el modelo de estadística descriptiva.

2.6.6.1 Validación del *ImageJ* en el laboratorio

La validación del software conexo ImageJ se realizó en el Laboratorio de Preparación y Concentración de Minerales. Adscrito al departamento de Minas, Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV. El cual sigue el siguiente método:

- I. Recolección de muestras: se recolectaron 20 kg de material de mina y se colocaron al sol durante 12 horas, previas a la trituración del material.
- II. Trituración de la muestra en laboratorio: se procede a la trituración del material por medio de dos trituradoras de mandíbula en circuito cerrado. La primera mandíbula con boca de admisión de 26 x 19 cm y un *seting* cerrado de 8 cm y la segunda mandíbula con boca de admisión de 12 x 9 cm y un *seting* cerrado de 1,5 cm.
- III. Cuarteo del material: esta fase se realizó por medio de un Cuarteador Jones de 45 x 20 cm. Se inició cuarteando los 20 kg de material, un total de cuatro veces hasta obtener una muestra representativa de dos kg de roca triturada. Este procedimiento se repite para obtener cuatro muestras representativas de dos kg cada una que son el 50% de la muestra total.
- IV. Tamizado de la muestra en laboratorio: el tamizado de la muestra se realizó siguiendo los métodos propuestos por Villalaz (2004). Para lo cual se emplea la siguiente batería de tamices: 2", 1^{1/4}", 3/4", 1/2", N°3, N°4, N°16, N°35, N°100, N°200.
- V. Registro fotográfico sobre el material triturado: este registro se obtiene tomando dos fotografías para cada muestra, una primera fotografía a 90° y un m de altura sobre el plano donde se distribuye la muestra y una segunda fotografía tomada a 45° y un m de altura con respecto al mismo plano.
- VI. Edición digital de las fotografías: para la edición digital se sigue siguiendo el método propuesto de edición fotográfica y usando el *software Inkscape*.

- VII. Análisis granulométrico: para el análisis granulométrico real se siguen los métodos propuestos por Villalaz (2004).
- VIII. Comparar curvas de distribución granulométrica: se comparan las curvas de distribución granulométrica mediante la función de graficar incorporada a la adaptación del BlastScheme.
- IX. Cálculo de error: se determina el porcentaje de error que genera el software entre los resultados teóricos y reales.

3 CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, se muestra el análisis de las bases teóricas que fueron necesarias para la elaboración de la Guía de Observación, seguido de los datos recopilados del sujeto de estudio y de igual manera, se exponen los algoritmos planteados para la solución de los procesos junto con la interface que componen la adaptación y verificación del *software BlastScheme*.

3.1 Análisis de bases teóricas

Para lograr la formulación de los instrumentos cualitativos y cuantitativos que permitieron la recolección de información correspondiente a las variables que intervienen en el modelamiento, proyección y control del proceso de voladura, se procedió al análisis de las bases teóricas fundamentales recopiladas en el marco teórico. El análisis tiene como finalidad codificar las variables de origen, desglosar las teorías de las mismas, comparar las teorías, establecer criterios para la discriminación de las variables fundamentales y recopilar las que tuviesen mayor relevancia para ser plasmadas en los instrumentos identificados como “Guía de Observación para día de Voladura” y la “Guía de Observación para el Control”.

3.1.1 Codificación de las variables

La codificación de las variables globales usadas en el desarrollo de la investigación se presenta en la Tabla 4, donde se ubica el nombre de la variable en la primera columna y la nomenclatura que identifica dicha variable en la segunda columna.

Tabla 4: Codificación de las variables

Variable	Nomenclatura
Diámetro (mm)	d
Altura del banco (m)	h
Longitud del barreno (m)	l
Sobre perforación (m)	sp
Longitud de carga de fondo (m)	hf
Longitud de carga de columna (m)	hc
Factor de inclinación (constante)	f
Desviación del barreno (m)	w
Densidad de la roca (g/cm^3)	dr
Densidad del explosivo (g/cm^3)	de
Potencia relativa en peso (constante)	rws
Constante de roca (constante)	c
Factor de carga (kg/m^3)	fc
Resistencia a la compresión simple (Mpa)	rc
Resistencia a la tracción (Mpa)	rt
Velocidad sísmica de propagación (m/s)	vs
Velocidad de detonación (m/s)	vd
Presión de detonación (kg/cm^2)	pd
Relación espaciado retiro (constante)	rel
Densidad de carga lineal (kg/m)	ql
Retiro (m)	b
Taco (m)	t
Carga total de explosivo (kg)	qt
Índice de uniformidad (constante)	n
Tamaño medio (cm)	k50

(Elaboración propia)

3.1.2 Comparación de las teorías

La comparación de las teorías se efectúa por medio de la sistematización de las variables, en función de los postulados propuestos por los diferentes autores para el diseño de la malla de perforación, el cálculo de carga explosiva y los modelos de fragmentación que se exponen en el marco teórico.

La sistematización se observa en las Tablas 5, 6, 7 y 8, donde se presentan en la columna izquierda el nombre del autor y número de la ecuación que lo identifica dentro de la recopilación teórica. En la fila superior se leen las variables que dicho

autor considera para su postulado, lo cual se representa mediante una “x” en las filas consecutivas a modo de señalar las variables empleadas. Adicionalmente, se presenta la frecuencia absoluta (FreqA) con la cual dicha variable es empleada de forma totalizada al final de cada tabla.

En cuanto a los postulados para el cálculo del retiro, se expone en la Tabla 5 la sistematización de variables para las ecuaciones de Langefors, Hansen, Ucar, Foldesi, López y Konya.

Tabla 5: Teorías de diseño de retiro

Variable vs Ecuación	d	h	l	s	h	h	f	d	d	r	C	f	r	v	v	p	r	r	b	q	t	q	n	k
	p	f	c	f	r	e	s	w	s	c	c	s	d	d	t	e	l	b	l	t	t	n	5	0
Langefors (Ec 16)	x						x		x	x	x							x						
Ucar (Ec 17)	x	x							x										x	x				
Foldesi (Ec 19)	x								x			x	x		x									
López (Ec 21)	x								x	x					x	x								
Konya (Ec 25)	x								x	x														
FreqA	5	1	0	0	0	0	1	2	5	1	1	2	2	1	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0

(Elaboración propia)

De la Tabla 5 se puede observar que las variables de mayor frecuencia para el cálculo del retiro son el diámetro y la densidad del explosivo. Adicionalmente, se observa que las variables que incorporadas por lo menos en dos de los postulados analizados son: la altura de banco, la densidad de roca, el factor de carga teórico y la velocidad de detonación.

En cuanto a las variables que son incluidas en sólo un postulado se señala: el factor de inclinación, la potencia relativa en peso, la constante de la roca, la velocidad sísmica de detonación, el retiro, densidad de carga lineal y la relación espaciamento retiro.

Cabe destacar que no son consideradas en cuenta para el cálculo de retiro las variables de sobre perforación, espaciamento, taco, longitud del barreno, presión de

detonación, resistencia a la tracción, variables referentes a distribución de explosivos y distribución granulométrica.

Por otra parte para los postulados empleados en el cálculo de espaciamiento, taco y sobreperforación, se presenta en la Tabla 6 la sistematización de variables para las ecuaciones de espaciamiento por Ash y Foldesi, taco calculado por Konya y sobreperforación calculado por Konya y Ash.

Tabla 6: Teorías de diseño de espaciamiento, taco y sobreperforación.

Variable vs Ecuación	d	h	l	s	h _f	h _c	f	d _r	d _e	r _w	C	f _c	r _c	v _s	v _d	p _d	r _t	r _e	b	q _l	t	q _t	n	k ₅₀		
Ash s (Ec 27)																			x							
Foldesi s (Ec 28)													x		x				x							
Konya t																			x							
Konya C sp (Ec 29)																			x							
Ash sp (Ec 30)																			x							
FreqA 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0

(Elaboración propia)

En relación al cálculo del espaciamiento, taco y sobre perforación, presentado en la Tabla 6, se puede observar que el retiro es la variable fundamental para todos los autores estudiados, siendo sólo Foldesi quien incorpora la resistencia a la compresión y la velocidad de detonación para el cálculo del espaciamiento.

Para los postulados de cálculo de carga explosiva, se presenta en la Tabla 7 la sistematización de variables para las ecuaciones de Konya como principal autor de cálculo de distribución de carga explosiva.

Tabla 7: Teorías para el cálculo de carga explosiva

Variable vs Ecuación	d	h	l	s	h	h	f	d	d	r	w	C	f	c	r	v	v	p	r	e	b	q	t	q	n	k	5	0
Konya qf (Ec 31)	x								x													x						
Konya hf (Ec 32)																					x							
Konya hc (Ec 33)			x	x	x																							
Konya fc (Ec 34)		x			x	x														x	x	x						
FreqA 2	1	1	1	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0

(Elaboración propia)

En la Tabla 7 referente a las teorías de Konya para el cálculo de carga explosiva, se observa que las variables de mayor frecuencia son el retiro y la concentración de carga lineal, seguido por la altura de carga de fondo, la sobreperforación, la altura de banco, el diámetro, la densidad del explosivo y el rel. Adicionalmente, se cuestionan que dejan de tener influencia las variables de factor f, densidad de roca, rws, constante c, factor de carga, resistencia a la compresión, velocidad sísmica de detonación, velocidad de detonación, presión de detonación, resistencia a la tracción y taco.

En cuanto a los modelos de fragmentación, se muestra en la Tabla 8 la sistematización de variables para las ecuaciones de k50 por Kuznetsov, Larson, Chung y SveDeFo. De igual manera se presenta la sistematización de variables para el coeficiente de uniformidad de Cuningham y el modelo de distribución granulométrica de Weibull.

Tabla 8: Teorías sobre modelos de fragmentación

Variable vs Ecuación	d	h	l	s	h	h	f	d	d	r	w	c	f	c	r	v	v	p	r	r	e	b	q	t	q	n	k	50
Kuznetsov K50 (Ec:1)										x		x													x			
Larson K50 (Ec 3)											x	x									x	x						
SveDeFo K50 (Ec 4)			x								x	x										x		x				
Chung K50 (Ec 6)		x					x						x								x	x			x			
Cunningham n (Ec 11)	x	x			x	x	x														x	x						
Weibull (Ec 8)																										x	x	
FreqA 3	1	2	1	0	1	1	2	0	0	1	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	1	2	1	1	

(Elaboración propia)

En la Tabla 8 referente a los modelos de fragmentación se presentan como variables de mayor frecuencia el factor de carga y el retiro, como variables que permiten calcular los parámetros de n y k50, los cuales son los parámetros fundamentales para el cálculo de la distribución granulométrica resultante del proceso de voladura, estudiado mediante las funciones de Weibull.

Analizando el parámetro de índice de uniformidad de Cuningham se observa que depende del diámetro, la altura del banco, las alturas de carga de fondo y columna, el factor de verticalidad, relación espaciamento retiro y el retiro.

En cuanto al parámetro k50, observamos que depende del factor de carga, el retiro y la constante de roca. Lo que se traduce en que el k50 es una variable que depende fundamentalmente del sistema de perforación y de cargas de la voladura.

3.1.3 Criterio para la discriminación de las variables

La discriminación de las variables establece como constante todos los parámetros referentes a las propiedades del explosivo y otras constantes propias de los postulados, con lo cual se obtienen los parámetros considerados como constantes: rws , factor de roca, factor de verticalidad, densidad del explosivo, velocidad de detonación y presión de detonación.

Al hacer esta primera discriminación, se identifican como variables de origen: la altura del banco, diámetro, longitud del barreno, factor de carga, densidad de la roca, resistencia a la compresión simple y velocidad sísmica de propagación. Esta discriminación de variables se observa gráficamente en la Figura 11.

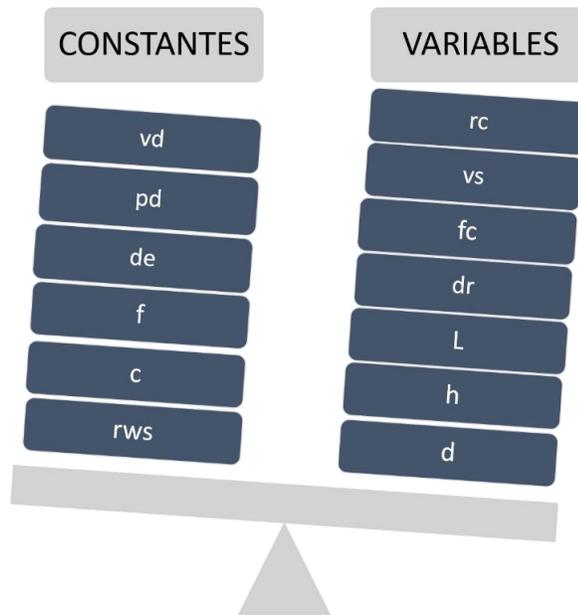


Figura 11: Discriminación de variables

(Elaboración propia)

3.1.4 Análisis de las variables controlables de la voladura

En esta sección se presenta el análisis detallado del efecto que tienen las variables de origen definidas en la sección anterior, sobre el cálculo del “retiro” como variable de mayor frecuencia dentro de los postulados analizados.

En base a la sistematización de la Tabla 8, se conoce que el diámetro es la variable común dentro del cálculo del retiro, por lo cual se analiza primero el efecto que tiene el diámetro sobre los postulados. Posteriormente, se evalúa de forma conjunta el efecto que tienen las variables restantes, contrastándolas de forma individual con la variación del diámetro.

3.1.4.1 Iteración del diámetro

La iteración del diámetro se realiza mediante la sustitución de dicho parámetro en los postulados de Langefors, Konya, Ucar, Foldesi y López. El diámetro se hizo variar entre 70 y 200 mm, considerando como fijos los parámetros iniciales de la Tabla 9.

Tabla 9: Parámetros iniciales de la iteración del diámetro

Variable	Valor
rc (Mpa)	70
dr (kg/cm ³)	1.9
fc (kg/m ³)	0.4
Rws	1
h (m)	10
de (kg/cm ³)	0.86
vd (m/s)	3460
vs (m/s)	5000

(Elaboración propia)

El proceso de iteración permite conocer el valor del retiro mediante los cinco autores señalados con una variación de 1 mm. El Gráfico 1 representa la variación del diámetro en su eje vertical en contraste con los valores de retiro representados en el eje horizontal.

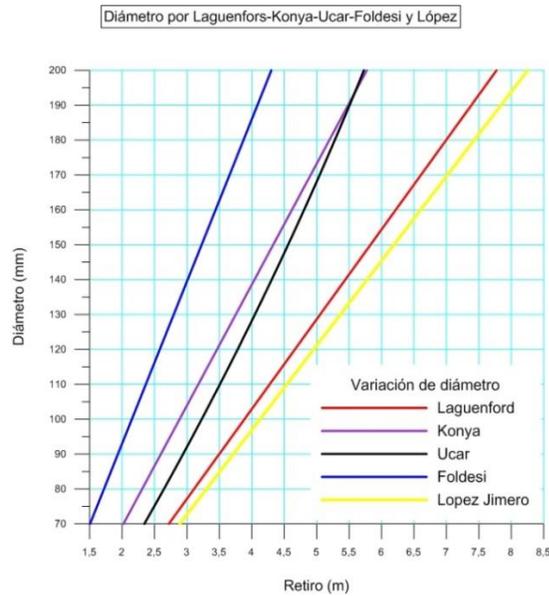


Gráfico 1: Iteración del diámetro

(Elaboración propia)

En el Gráfico 1 se observa cómo existen tres comportamientos marcados para los postulados, teniendo a Foldesi como un postulado que representa el límite inferior de los resultados. De igual manera, se puede decir que los autores Ucar y Konya poseen un comportamiento similar, donde se acercan gradualmente hasta que para un diámetro de 190 mm presentan un único valor de 5,5 m de retiro. Por último, se establece que Langefors y López presentan los valores de retiro más elevados para cualquier diámetro, haciéndose divergentes a medida que aumenta el diámetro.

3.1.4.2 Iteración de variables originales respecto al diámetro

En cuanto a la iteración de las variables de altura, densidad de la roca, resistencia a la compresión simple y factor de carga. Todas estas variables se contrastan con la iteración del diámetro para cada autor que incorpora dichas variables.

En cuanto a los límites de análisis, la altura se hace variar entre 3 y 20 m tomando como base el postulado de Ucar. Mientras por su parte, la densidad se hace variar entre 2 y 3,2 kg/cm³ basado en los postulados de Konya y López. La resistencia a la compresión simple varía entre 30 y 400 Mpa basado en Langefors y Foldesi y, por último, el factor de carga entre 0,2 y 3,2 kg/m³, basado en Foldesi. Para todas las

iteraciones se utilizan los parámetros fijos que se observan en la Tabla 10 y se itera la variable correspondiente en cada uno de los casos.

Tabla 10: Parámetros iniciales de la iteración

Variable	Valor
rc (Mpa)	70
d (mm)	89
dr (kg/cm ³)	1.9
fc (kg/m ³)	0.4
rws	1
de (kg/cm ³)	0.86
vd (m/s)	3460
vs (m/s)	5000

(Elaboración propia)

Producto del proceso de iteración se obtienen los Gráficos 2, 3, 4 y 5. En ellos se observa el retiro en su eje horizontal, en función del diámetro como eje vertical primario. De igual forma se presenta un segundo eje vertical, el cual adquiere el valor de las variables de origen que se evalúa en cada caso.

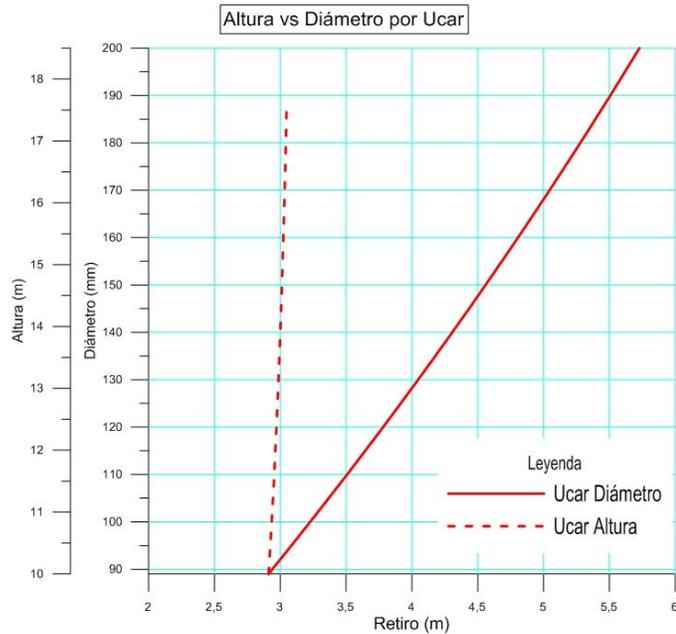


Gráfico 2: Iteración de la altura versus diámetro

(Elaboración propia)

Densidad vs Diámetro por Konya y López

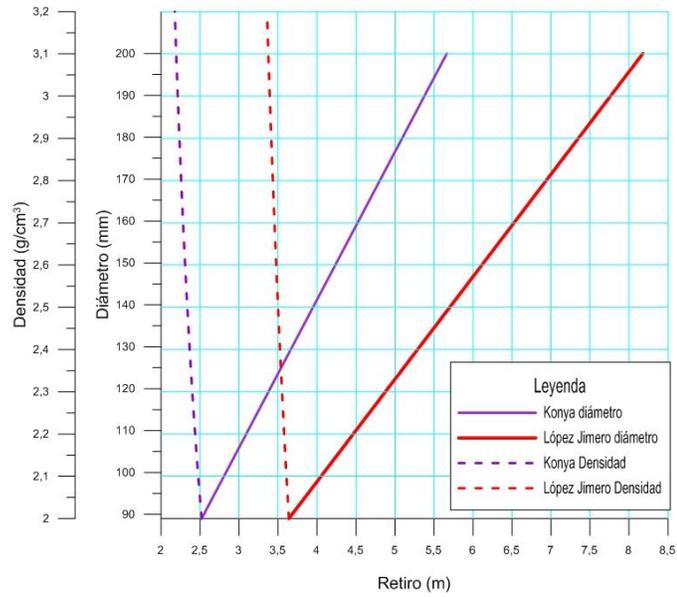


Gráfico 3: Iteración de la densidad versus diámetro

(Elaboración propia)

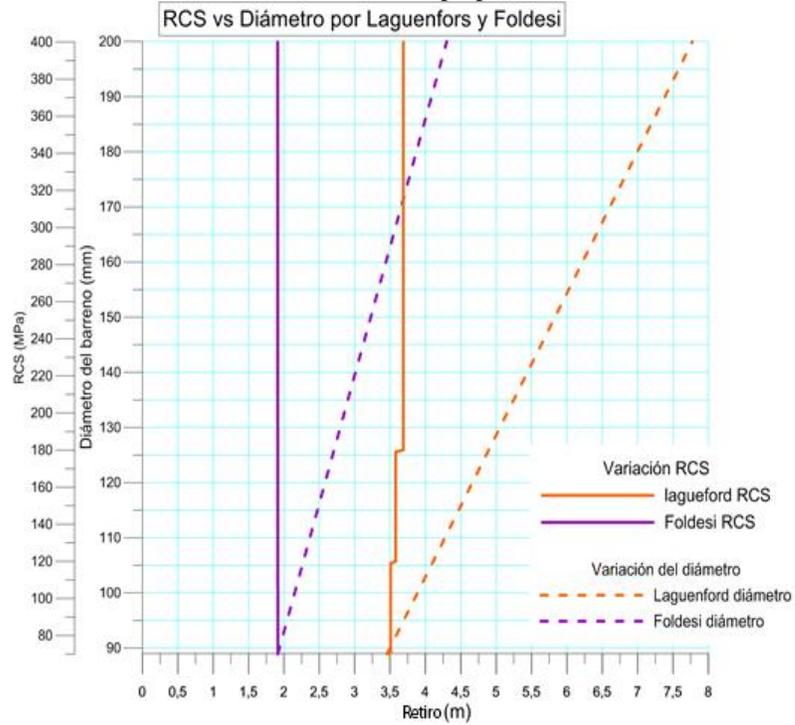


Gráfico 4: Resistencia a la compresión simple versus diámetro

(Elaboración propia)

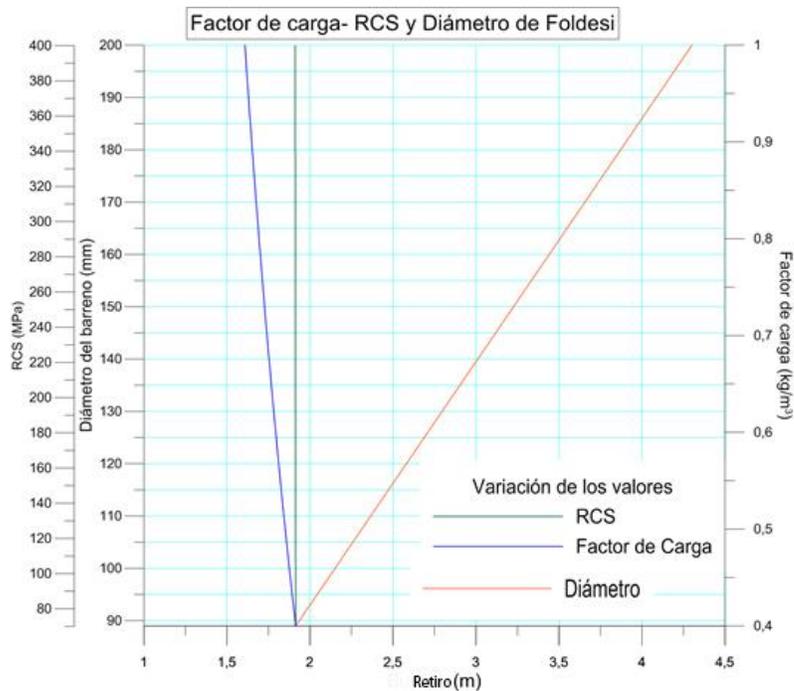


Gráfico 5: Iteración del factor de carga versus el diámetro y la RCS

(Elaboración propia)

En los Gráfico 2, 3, 4 y 5 se observa cómo los cambios de las variables de origen no supera ninguna los 0,5 m de retiro a lo largo de todo el intervalo de análisis. Para todos los autores la variación del diámetro supera al resto de las variables pudiendo alcanzar valores de 4,5 m de variación, como se observa en el Gráfico 4 para Langefors, lo cual señala, que la variación de las variables originales de la voladura como la altura, la resistencia a la compresión simple, la densidad de la roca y el factor de carga no representa una variación significativa en cuanto al cálculo del retiro por medio de los postulados.

3.1.5 Análisis de los postulados de tamaño medio de fragmentación

Para ello se estudian los postulados presentados por Kuznetsov, Larson, SveDeFo y Chung para el cálculo del tamaño medio de fragmentación (k_{50}), por medio de la iteración de las variables iniciales de factor de carga, carga total, constantes de la roca, longitud del barreno y la relación espaciamiento retiro (s/b). De igual manera, se

presenta la comparación de los cuatro autores mediante la iteración de las variables de origen ya mencionadas.

3.1.5.1 Análisis de variables de Kuznetsov

Mediante la iteración de la Ecuación 1, se establece este análisis, tomando como variables iniciales las presentadas en la Tabla 11 y realizando las modificaciones correspondientes sobre la ecuación al variar el factor de carga y la carga total, esto debido a que estas variables se consideran interrelacionadas por medio de la Ecuación 34.

Tabla 11: Variables iniciales para el análisis de Kuznetsov

Variable	Valor
Factor de carga (kg/m^3)	0,5
RWS	100,0
Carga de explosivo (kg)	57,0
Factor de roca (kg/m^3)	10,0
Retiro (m)	3,0
Altura (m)	10,0

(Elaboración propia)

En base a estos parámetros iniciales, se realiza la variación del factor de carga con un diferencial de $0,05 \text{ kg}/\text{m}^3$, la carga total se varia con diferencial de 1 kg, constantes de la roca con un diferencial de $0,05 \text{ kg}/\text{m}^3$, longitud del barreno con diferencial de 1 m y la relación espaciamento retiro con un diferencial de 0,1 unidades. Esta iteración se observa en el Gráfico 6.

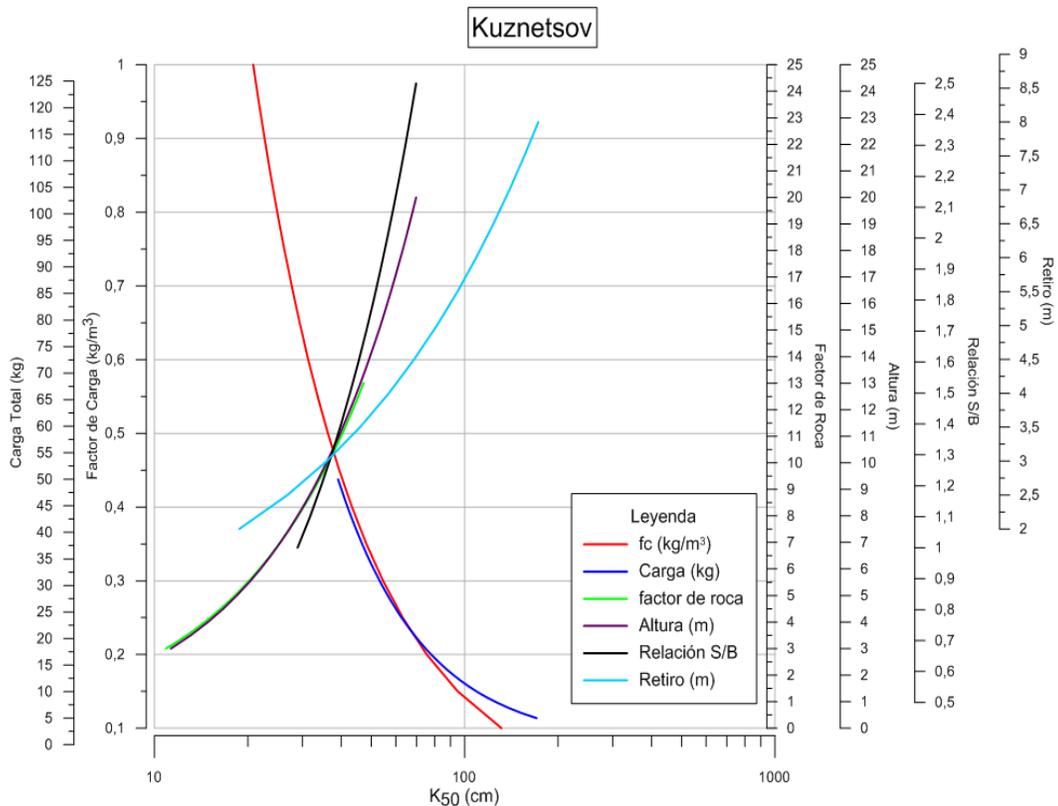


Gráfico 6: Análisis de variables de Kuznetsov

(Elaboración propia)

En el Gráfico 6 la relación que existe entre el factor de carga y la carga total por barreno, en vista que ambas gráficas presentan comportamiento similar; observa que: a medida que el factor de carga disminuye, el tamaño medio del bloque aumenta, hecho que está relacionado directamente con la carga total y es por esta razón que a medida que la carga total de explosivo disminuye, aumenta el tamaño de k50 en la misma proporción para el factor de carga.

En relación a los parámetros de factor de roca, altura y la relación s/b, estos presentan un comportamiento similar, donde para aumentos de estas variables se existe un aumento del tamaño medio (k50). En cuanto al retiro, este presenta la mayor variación con respecto al resto de las variables, donde para aumentos de esta variable, se aumenta el tamaño medio del bloque. La razón es debido a que el aumento del retiro disminuye el factor de carga, lo cual incide directamente sobre el comportamiento de la ecuación.

3.1.5.2 Análisis de variables de Larson y SveDeFo

El análisis de variables se realizó mediante la iteración de la Ecuación 3 para Larson y Ecuación 4 para SveDeFo. Se toman como variables iniciales las presentadas en la Tabla 12 y realizando las modificaciones correspondientes en cuanto al factor de carga planteado en la Ecuación 34.

Tabla 12: Datos iniciales

Variables	Valor
Retiro (m)	3,0
s/b	1,25
Factor de carga (kg/m ³)	0,5
Constante de volabilidad "c" (kg/m ³)	0,4
Constante "S"	0,6
Carga total (kg)	57,0
Altura (m)	10,0

(Elaboración propia)

En base a estos parámetros iniciales, se realiza la variación del factor de carga con un diferencial de 0,5 kg/m³, para las constantes de la roca se varia con un diferencial de 0,05, para el retiro un diferencial de 0,5 m, para la longitud del barreno se considera de 1 m, para el factor "S" de 0,1 unidades y para la relación espaciamiento retiro se varió con un diferencial de 0,1 unidades. Esta iteración se puede observar gráficamente en las Gráficos 7 y 8.

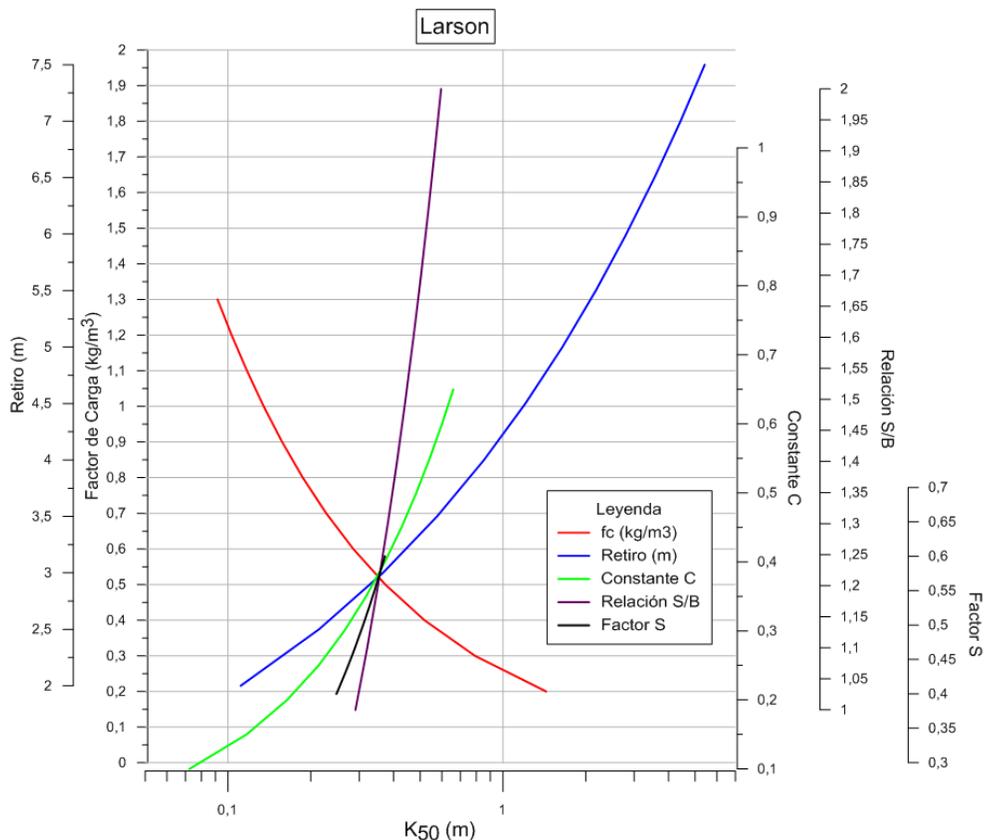


Gráfico 7: Análisis de variables de Larson

(Elaboración propia)

Para el Gráfico 7, las mayores variaciones se presentan para las variables de retiro, factor de carga y constante de roca “c”. A diferencia del postulado de Kuznetsov, Larson considera al retiro como una variable central, la cual tiene el mayor peso dentro de la gráfica, seguido del factor de carga y la constante de roca. Este último par de variables tiene peso sobre la gráfica, pero en menor proporción que el retiro. Por otro lado la relación S/B y el factor de roca “S”, poseen un efecto menos apreciable que el presentado por las variables anteriores.

En relación al comportamiento del postulado ante la iteración, destaca que el tamaño de bloque aumenta ante lo siguiente: disminución del factor de carga, incremento del retiro, la constante de volabilidad “c”, factor “S” y la relación s/b.

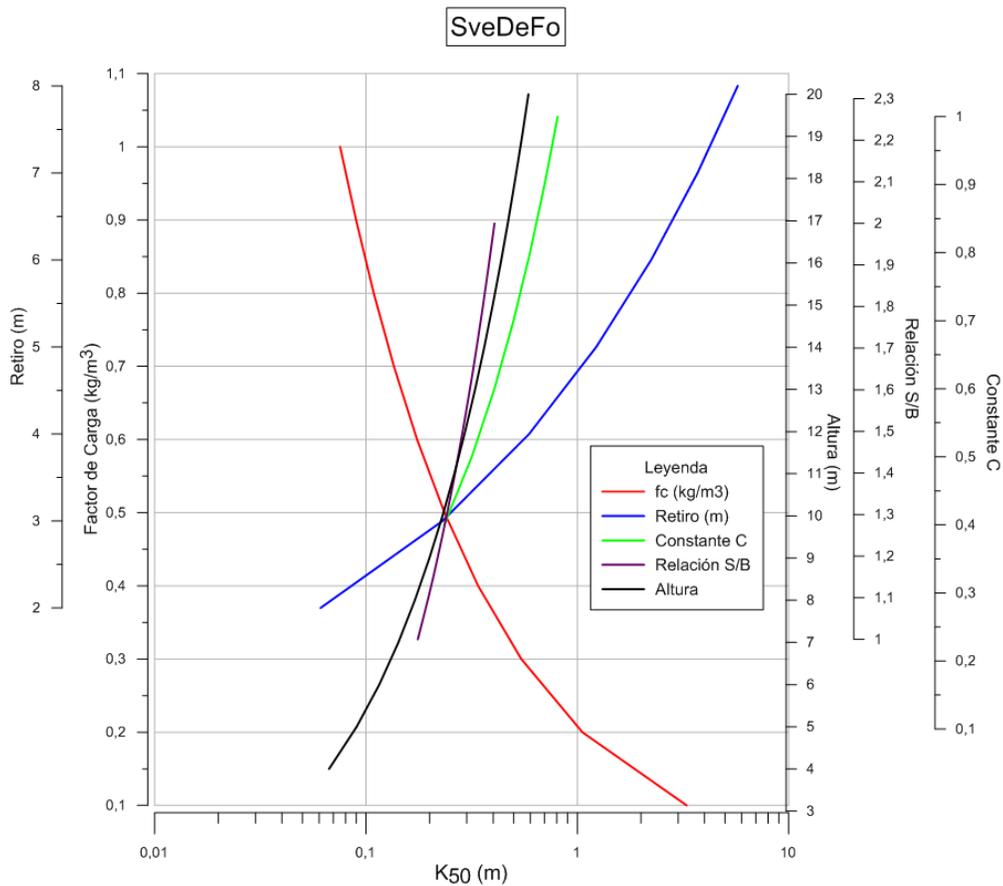


Gráfico 8: Análisis de variables de SveDeFo

(Elaboración propia)

De el Gráfico 8 se observó que las mayores variaciones se presentaron para las variables de retiro y factor de carga. Al igual que Larson, SveDeFo considera al retiro y al factor de carga como variables centrales, siendo de igual manera las de mayor peso dentro de la gráfica. En cuanto a la relación S/B, la constante de roca “c” y la altura, se observó que su efecto es menos apreciable que el presentado por las variables anteriores.

En relación al comportamiento del postulado ante la iteración, se observó que el tamaño de bloque aumenta ante lo siguiente: la disminución del factor de carga, aumento del retiro, aumento de la constante de volabilidad “c”, aumento de la altura y aumento de la relación s/b.

3.1.5.3 Análisis de variables de Chung y Katsabanis

El análisis de variables se realizóa mediante la iteración de la Ecuación 6, tomando como variables iniciales las presentadas en la Tabla 13 y con las modificaciones correspondientes para al factor de carga planteado en la Ecuación 34.

Tabla 13: Datos iniciales de las variables de Chung y Katsabanis

Variable	Valor
Retiro	3,00
S/B	1,25
Espaciamiento (m)	3,75
Factor de roca A	10,0
Factor de carga (kg/m ³)	0,50
Altura (m)	10,00
Carga total (kg)	57,00

(Elaboración propia)

En base a estos parámetros iniciales se realiza la variación de: factor de carga con un diferencial de 0,1 kg/m³, factor A de la roca con una diferencia de 0,1; retiro con variación de 1 m, longitud del barreno con 1 m y la relación espaciamento-retiro con un diferencial de 0,05 unidades. Esta iteración se puede observar en el Gráfico 9.

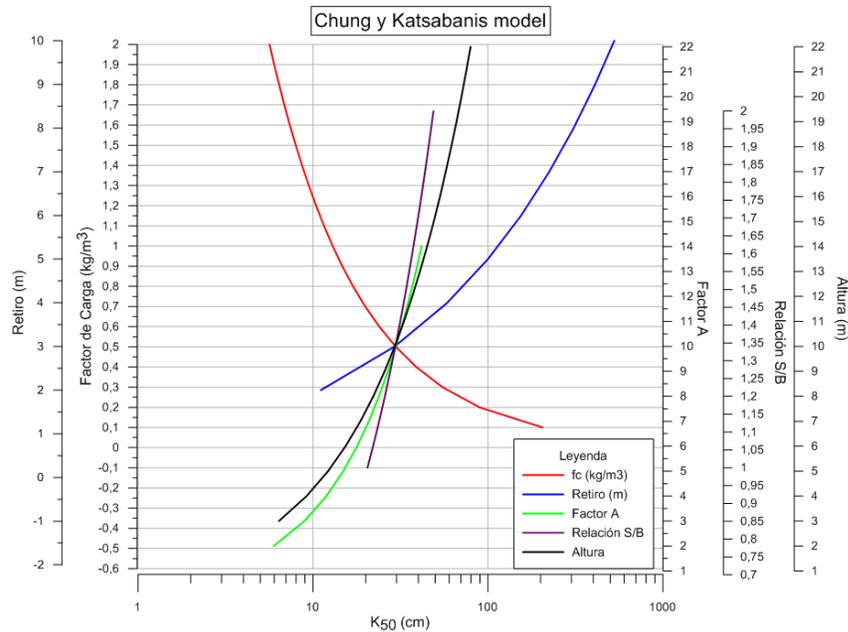


Gráfico 9: Análisis de variables retiro de Chung y Katsabanis

(Elaboración propia)

En el Gráfico 9 se mantiene el comportamiento de los postulados analizados anteriormente, donde el factor de carga y el retiro presentan las variaciones más marcadas, seguidos del factor de roca A, la relación espaciamiento-retiro y la altura.

En relación al comportamiento del postulado de Chung y Katsabanis ante la iteración, se tiene que el tamaño de bloque aumenta ante lo siguiente: disminución del factor de carga, aumento del retiro, la constante de roca A, la altura y la relación espaciamiento-retiro.

3.1.6 Comparación de los postulados de tamaño medio de roca (k50)

En esta sección se compararon los postulados de Kuznetsov, Larson, SveDeFo y Chung-Katsabanis para el cálculo del tamaño medio de fragmentación (k50), por medio de la iteración de las variables iniciales de factor de carga, longitud del barreno o altura, retiro y carga total.

3.1.6.1 Factor de carga

La comparación del factor de carga para los postulados de k50 se presenta mediante el Gráfico 10. Este se compone del factor de carga en kg/m^3 en el eje vertical y el tamaño medio de fragmentación en metros en su eje horizontal.

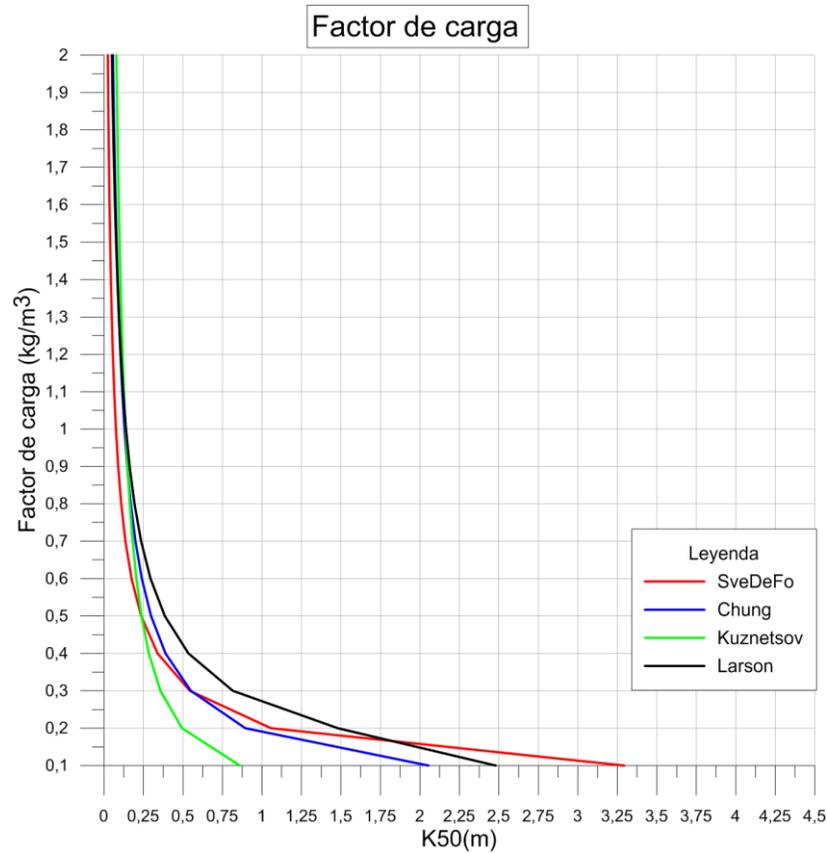


Gráfico 10: Análisis de los postulados de fragmentación en función del factor de carga

(Elaboración propia)

Podemos observar como se muestra en el Gráfico 10 que los cuatro postulados presentan un comportamiento entre 0 y 0,25 metros hasta alcanzar un factor de carga de $0,7 \text{ kg/m}^3$. A partir de ese punto, se encuentran valores entre 0 y 0,50 metros hasta los $0,4 \text{ kg/m}^3$ donde el comportamiento cambia y aumenta el tamaño medio de los fragmentos en gran proporción, por lo que se encuentra en las formulas valores de 0,87 para Kuznetsov y 3,25 para SveDeFo, con valores centrales de 2 y 2,5 metros para Chung y Larson respectivamente.

3.1.6.2 Altura

La comparación de la altura para los postulados de k50 obtiene como resultado el Gráfico 11. Este se compone de la altura en metros en el eje vertical y el tamaño medio de fragmentación igualmente en metros en su eje horizontal.

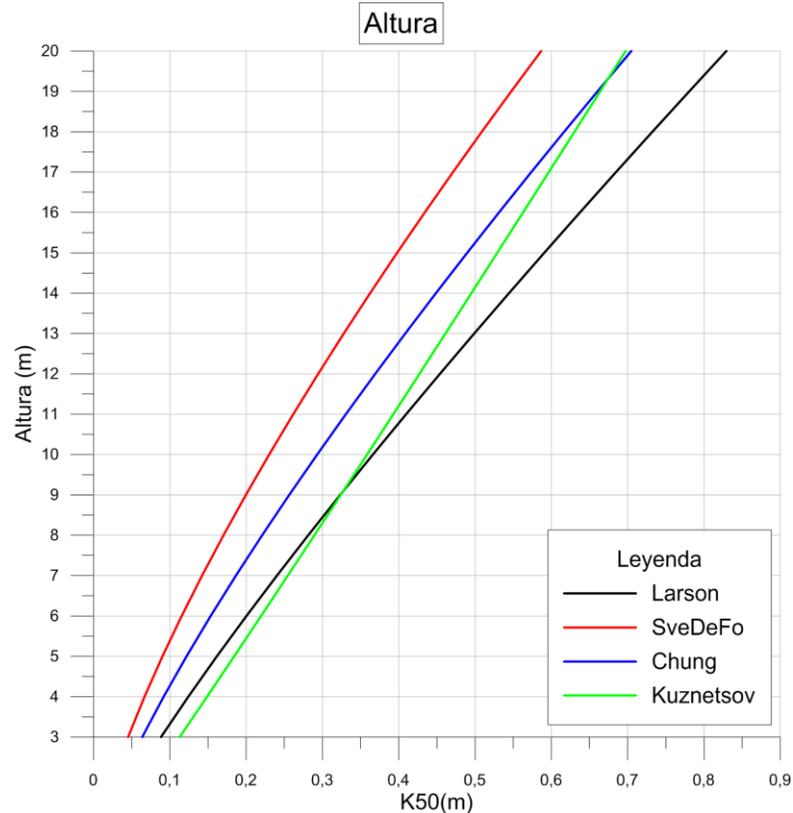


Gráfico 11: Análisis de los postulados de fragmentación en función de la altura

(Elaboración propia)

En el Gráfico 11 la comparación de la altura no presenta un comportamiento homogéneo para los postulados al variar la profundidad de la perforación. Por ejemplo, SveDeFo presenta los valores más bajos de k50 para toda altura, mientras que Kuznetsov tiene los valores más elevados de k50 hasta alcanzar los 9 metros de altura, donde Larson pasa a ser el postulado que presenta los valores de k50 más elevados. En cuanto a la ecuación de Chung y Katsabanis, tiene un comportamiento medio a lo largo de la gráfica hasta los 19 metros donde se intersecta con la gráfica de Kuznetsov.

3.1.6.3 Retiro

La comparación del retiro para los postulados de k50 se realizó mediante el Gráfico 12. Este gráfico se compone del retiro (m) en el eje vertical y el tamaño medio de fragmentación (m) en su eje horizontal.

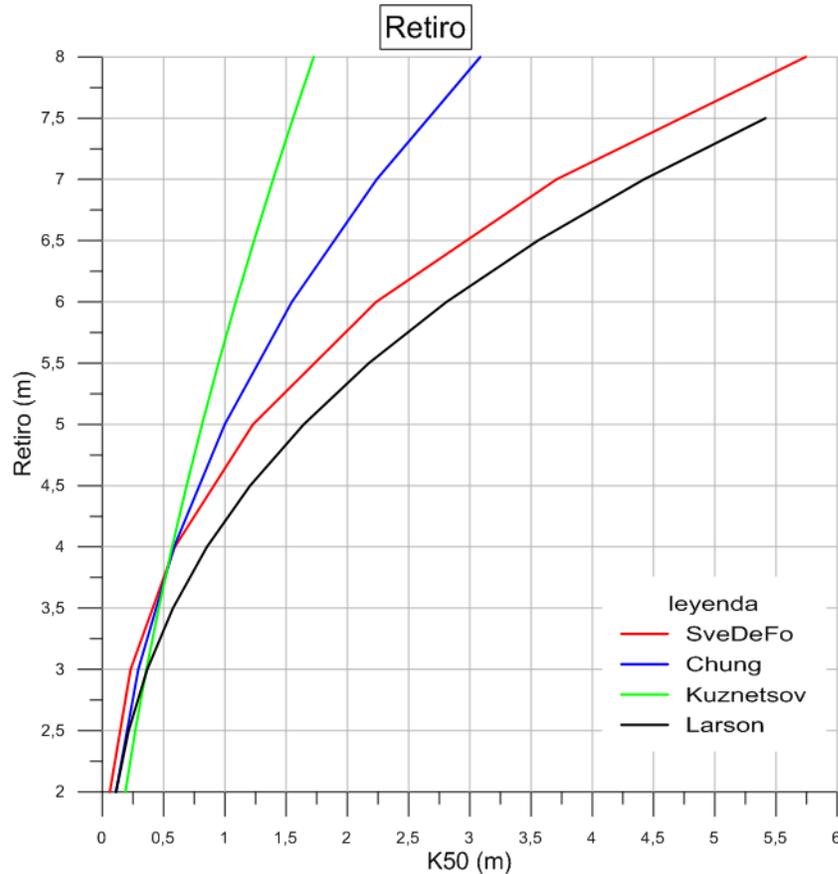


Gráfico 12: Análisis de los postulados de fragmentación en función del retiro

(Elaboración propia)

Para el retiro en el Gráfico 12, se tiene que hasta los 3 metros todos los postulados mantienen un comportamiento similar y presentan valores entre 0 y 0,50 metros. Destaca que, a partir de los 3 metros, Larson comienza a presentar siempre el mayor valor de k50 para todo retiro.

Los postulados restantes, de 3 a 4 metros presentan un comportamiento con poca variación entre sí, intersectándose en 4 metros y haciéndose divergentes a partir de este punto. Luego de superados los 4 metros, Kuznetsov pasa a ser el postulado el que

arroja el menor valor de k_{50} para todo retiro y los autores de Chung y SveDeFo se integran con un comportamiento intermedio durante todo en intervalo de evaluación.

3.1.6.4 Carga total

La comparación de la carga total para los postulados de k_{50} se expone en el Gráfico 13. Esta figura se compone de la carga total en kilogramos en el eje vertical y el tamaño medio de fragmentación en metros en su eje horizontal.

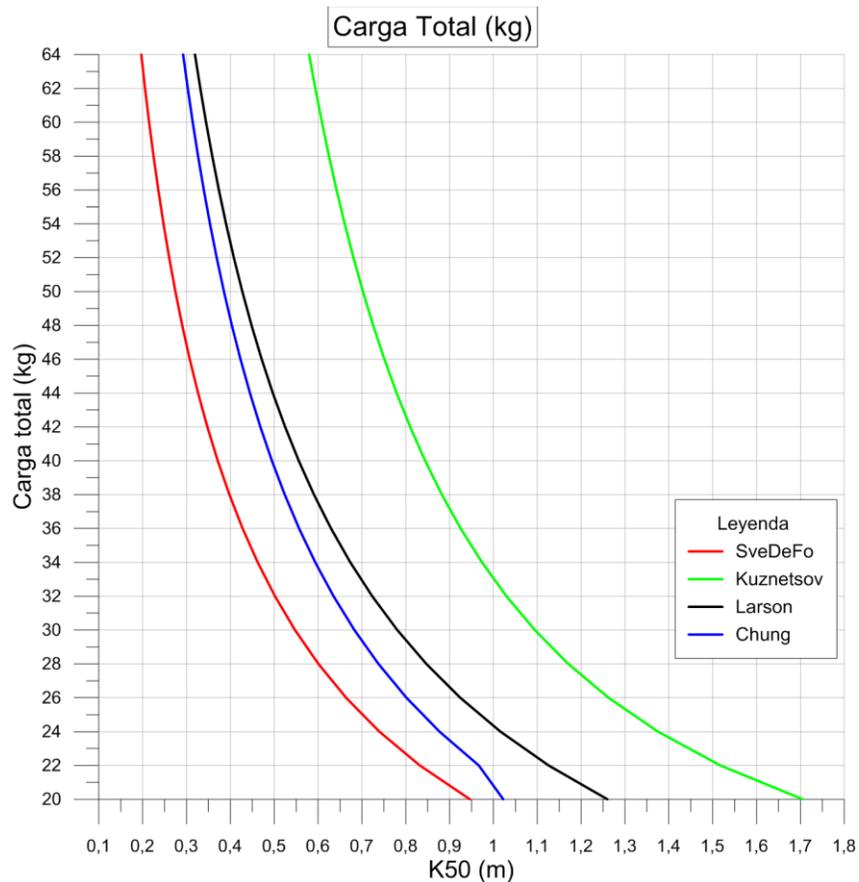


Gráfico 13: Análisis de los postulados de fragmentación en función de la carga total

(Elaboración propia)

Para el parámetro de carga total, se puede observar que las curvas se comportaron de forma exponencial y aproximadamente paralelas entre sí. El postulado de SveDeFo presenta los menores valores de k_{50} para toda carga explosiva y el postulado de Kuznetsov mayores valores de k_{50} para toda carga.

3.1.7 Análisis de Weibull

El análisis de la función Weibull se obtiene mediante la iteración de la Ecuación 28, para la cual se fijó un k_{50} de 50 cm y se procede a generar gráficas de distribución granulométrica para 1000 valores de x ordenados de forma ascendente. De igual manera se varía el índice de uniformidad, tomando como puntos de análisis los “ n ” igual a: 0,3- 0,5- 1- 1,5- 2 y 5. Dicha gráfica se encuentra representada en el Gráfico 14.

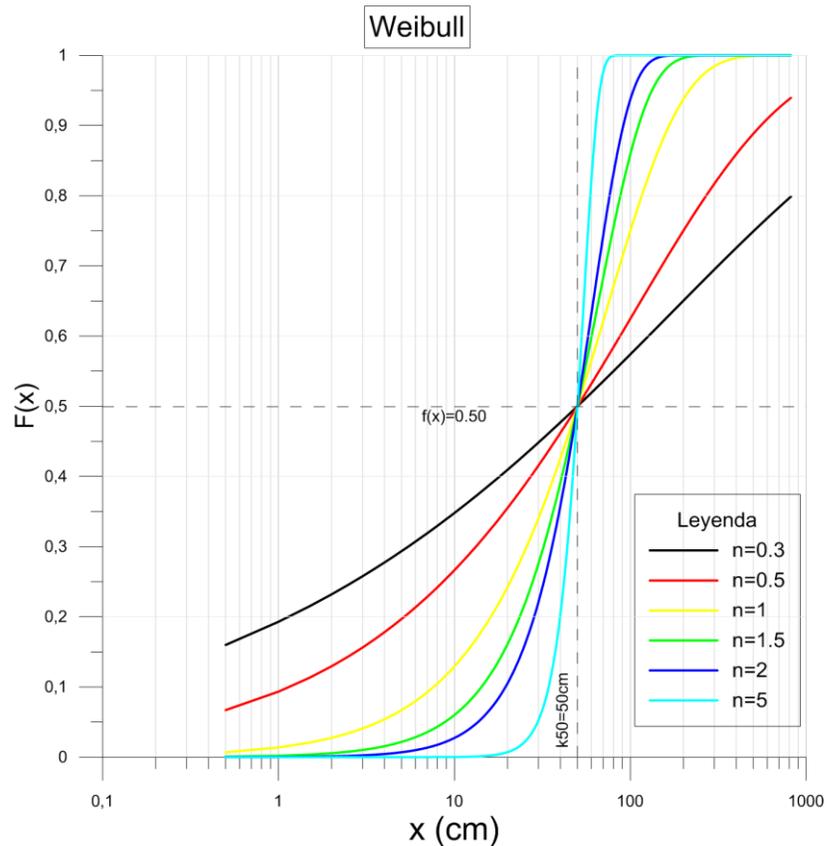


Gráfico 14: Distribución Weibull con variación del índice de uniformidad

(Elaboración propia)

En el Grafico 14 se estima que la función de distribución Weibull el valor de k_{50} actúa con un punto pivote, dicho punto, fija el valor central de la distribución y actúa como un parámetro de escala. Con la variación del k_{50} se consigue desplazar la curva hasta valores más gruesos o más finos de la distribución.

En cuanto al índice de uniformidad, se tiene que a mayores valores de n , la función se encuentra más cercana a su valor central $k50$. Esto se manifiesta en la curva de $n=5$, donde la totalidad de la función se acumula entre 40 y 80 cm. Por el contrario, a valores de n entre 1 y 2, se tiene una curva más homogénea y cercana a la distribución de tamaños resultante de procesos de fragmentación.

3.1.8 Análisis del índice de uniformidad (n)

El análisis del índice de uniformidad se consigue mediante la iteración de la Ecuación 34, correspondiente al parámetro “ n ” propuesto por Cuningham. Para ello se construye el Gráfico 15, donde se representa la iteración de los siguientes parámetros: altura, diámetro, retiro, desviación de la perforación, relación espaciamento-retiro y longitud de carga explosiva.

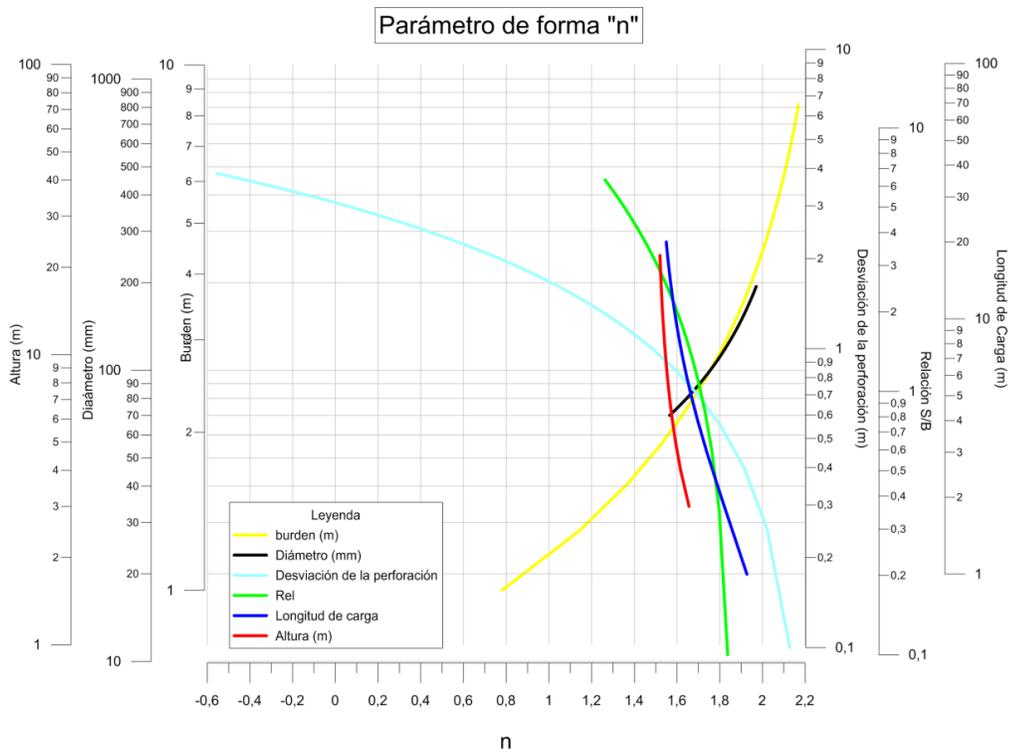


Gráfico 15: Análisis del índice de uniformidad de Cuningham

En el Gráfico 15 la desviación de la perforación reduce el índice de uniformidad en mayor proporción al superar un metro de desviación, antes de superar el metro, la función presenta un comportamiento con valores entre 2,2 y 1,4.

En cuanto al retiro, el comportamiento es de forma inversa a la desviación, debido a que al aumentar el valor del retiro, aumenta el índice de uniformidad, lo que indica que la distribución final se acerca al valor central, sin embargo, entre valores de retiro de 2 y 5 metros comunes para voladura en canteras, los valores de índice de uniformidad se encuentran en 1,6 y 2, lo cual describe una buena distribución de tamaños según el análisis de la función Weibull.

Los parámetros de altura y longitud de carga no presentan una variación significativa sobre la gráfica. Pero en caso contrario, el diámetro y la relación espaciamento-retiro si presentan variación dentro de la misma. Con respecto al diámetro, a medida que este aumenta lo hace también el parámetro de uniformidad, lo que indica que para mayores diámetros, tendremos una distribución de tamaños más cercana al valor central.

3.2 Formulación de la guía de observación

La formulación de la guía de observación se logra por medio del análisis de las bases teóricas. En esta sección entonces se plantea el diseño de dos guías de observación: Guía de Observación para día de voladura y otra Guía de Observación para Control de voladuras.

3.2.1 Guía de Observación para día de Voladura

En base al análisis de los postulados, se determina como variables controlables fundamentales para el diseño de esquemas de voladura y estimación granulométrica, las siguientes:

- Retiro
- Espaciamiento
- Profundidad de los barrenos
- Taco
- Carga total
- Factor de carga
- Diámetro

Adicional a estas variables, fue necesario incorporar otras variables complementarias propias de la operación unitaria de arranque indirecto, como son:

- Carga de columna por sacos
- Carga de fondo con cartuchos de emulsión

El incorporar estas dos variables complementarias en las unidades propuestas, admitió aplicar correcciones sobre el factor de carga, en vista que, al incorporar las emulsiones en cartuchos, se disminuye los kg totales de emulsión, y por consiguiente el factor de carga al reducir la carga total por barreno.

Igualmente existen variables de carácter operativo necesarias para lograr una mayor recolección de información, como son, costo de los explosivos, volumen total a volar y numero de barrenos.

De igual manera, se incorporaron variables no controlables relativas a las condiciones del frente libre, las características de la roca, características de la perforación, condiciones climáticas y posibilidad de ocurrencia de errores humanos.

En base a lo expuesto en esta sección, en la Tabla 33 se muestra el diseño de la composición de la Guía de Observación para el día de la Voladura.

Tabla 14: Guía de observación día de voladura

Lugar de la voladura:						
Fecha:			Empresa:			
VARIABLES DE LA VOLADURA			Esquema			
			1	2	3	4
(1) Retiro (m)						
(2) Espaciamiento (m)						
(3) Profundidad del barreno (m)						
(4) Taco (m)						
(5) Diámetro del barreno (Pul)						
(6) Volumen a volar (m ³)						
(7) Número de barrenos						
(8) Carga de fondo (tipo de explosivo usado)						
(9) Carga de columna (tipo de explosivo usado)						
(10) Factor de carga (kg/m ³)						
(11) Costo de ANFO			sacos			kg
(12) Costo por emulsión			cajas			kg
(13) Costo de perforación por m lineal						
(14) Costo total de accesorio por barreno						
Condiciones Geológicas						
(15) Condiciones de la cara libre	Bien perfilado	()	Con obstáculos	()	No existe	()
(16) Sistemas de diaclasa	Roca intacta	()	Medianamente fracturada	()	Muy fracturada	()
(17) Piso de trabajo	Horizontal	()	Inclinado	()	Irregular	()
(18) Sentido de la detonación	Mismo sentido de la foliación	()	Sentido contrario de la foliación	()	Desconocido	()
(19) Tipo de roca	Caliza	()	Arenisca	()	Mármol	()
	Dolomita	()	Esquisto	()	Gabro	()
	Granito	()	Cuarcita	()	Otro:	()
Características del Esquema						
(20) Barrenos tapados	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
(21) Barrenos cortos	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
(22) Barrenos con agua	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
(23) Barrenos desviados	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
(24) Barrenos con cavernas	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
(25) Sobre-tamaños previos	Existencia	si ()	no ()	Cantidad		
				Diámetro		
(26) Material del taco	Detritus	()	Piedra picada			()
(27) Características de la perforación	Tresbolillo	()	Cuadrada	()	Mixta	()

Observaciones adicionales	
(28) Condiciones climáticas	
(29) Otras observaciones referentes a los esquemas	
(30) Croquis del patrón de perforación	

(Elaboración propia)

3.2.1.1 Instrucciones para el llenado de la guía:

- a) En los ítems del 1 al 10 se ingresa el valor correspondiente para cada variable. Cada variable puede asumir más de un valor, por lo cual, se considera un nuevo esquema de voladura, cuando exista el caso que una variable adquiera más de un valor.
- b) En los ítems del 11 al 14 se ingresa la información de los costos de explosivo utilizados en la voladura.
- c) Con respecto a los ítems del 15 al 19 se indica con “x” sólo una de las alternativas planteadas en cada fila.
- d) En los ítems del 20 al 25 se indica con “x” la existencia de alguna de las condiciones de perforación planteadas en estos ítems. En caso de ser afirmativo, se deberá colocar la cantidad aproximada de barrenos que presenta dicha característica.
- e) En los ítems del 26 y 27 se indica con “x” sólo una de las alternativas planteadas en cada fila.
- f) En los ítems del 28 y 29 se ingresan las observaciones que se consideren pertinentes.

- g) En el ítem 30 se propone elaborar un croquis del área de voladura con las correspondientes indicaciones de frente libre y esquema general de perforación.

3.2.2 Guía de Observación para Control de Resultados de las Voladuras

En base a las teorías de evaluación de resultados posterior a la voladura, se diseña la denominada Guía de Observación para el Control de Voladuras considerando como variables la fragmentación, el esponjamiento y desplazamiento de la voladura. Estas variables se miden mediante una escala de Likert, en donde se señala si la variable es catalogada como muy buena, buena, regular, mala o muy mala. Esta estimación se efectúa principalmente de forma visual, sin embargo, para dicha inspección de la voladura se incorpora una escala adicional que indica el porcentaje de sobretamaño que puede estimarse como muy bueno o muy malo, según indicaron los expertos que participaron en la validación de dichos instrumentos. Dicha guía de observación se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: Guía de Observación para el Control de Voladuras

Lugar de la voladura:			
Fecha:		Empresa:	
<u>Fragmentación</u>			
(1) <u>Inspección visual de la voladura</u> (Con respecto al sobre-tamaño)		<u>Dimensiones del triturador primario y sobretamaño</u>	
Muy buena	0%	()	(2) Admisión máxima (m)
Buena	0-5%	()	(3) Admisión promedio (m)
Regular	5-10%	()	(4) Diámetro de sobretamaño promedio (m)
Mala	10-15%	()	(6) Toneladas de material procesadas en planta (opcional):
Muy mala	>15%	()	
(7) Esponjamiento		(8) Desplazamiento	
Muy bueno		()	Muy bueno ()
Bueno		()	Bueno ()
Regular		()	Regular ()
Malo		()	Malo ()
Muy malo		()	Muy malo ()
(9) Altura final de la pila (m) (opcional)			(10) Metros desplazados (opcional)

(Elaboración propia)

3.2.2.1 Instrucciones para el llenado de la guía

- a) En el ítem 1 se marca con “x” sólo una de las alternativas planteadas.
- b) En el ítem 2 y 3 se coloca la información referente a las dimensiones del triturador primario en los recuadros correspondientes para la admisión media y la admisión máxima.
- c) En los ítems del 5 y 6 se coloca la información de la dimensión de sobretamaño promedio y el volumen de sobretamaño promedio observado de voladuras previas.
- a) En los ítems 6, 9 y 10 se coloca de forma opcional la información de toneladas de material procesadas en planta, altura final de la pila y los metros desplazados.

3.3 Aplicación de las guías de observación

Para lograr la aplicación de los instrumentos cualitativos y cuantitativos en la recolección de las variables en el sujeto de estudio. Se procedió a asistir a los procesos de perforación y voladura, para así aplicar la Guía de observación día de voladura y la Guía de Observación para el Control de Voladuras. Esta aplicación se realizó siguiendo el método correspondiente para su implementación expuesto en el capítulo 2 de este trabajo.

3.3.1 Descripción de los frentes de voladura

En este apartado se describen las características generales de los frentes de voladura (FV) utilizados como foco de atención para la presente investigación.

3.3.1.1 FV cantera Constructora Pedeca C.A. Clarines

Este frente se caracteriza por tener dos caras libre y una zona de sobretamaño intermedia entre ambas caras libres. La primera cara libre tiene una altura aproximada de 5 metros y bloques dispersos, tanto en el pie como en la cresta. Adicionalmente, se observa una dirección de foliación prominente en las rocas, la cual se señala sobre la Figura 4 con líneas rojas.



Figura 4: FV Cantera Clarines en la Cara Libre 1

(Elaboración propia)

La segunda cara libre se caracteriza por tener una altura similar de 5 metros con bloques dispersos, tanto en el pie como en la cresta del banco; estos bloques poseen la característica de ser de forma tabular o cúbica, lo que indica que existe la tendencia en el macizo de generar un bloque de dichas características. Adicionalmente, se observa una dirección de foliación prominente en las rocas, la cual se señala con líneas rojas dentro de la Figura 5.



Figura 5: FV Cantera Clarines en la Cara Libre 2

(Elaboración propia)

La zona intermedia entre ambos frentes posee una gran cantidad de sobretamaños que superan en su mayoría los 2,5 metros de diámetro, lo cual se observa en la Figura 6, tomando como referencia la altura del personal cercano a los bloques con una estatura promedio de 1,60 metros.



Figura 6: Visualización de los sobretamaños del frente de voladura
(Elaboración propia)

3.3.1.2 FV cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar

El proceso de perforación y voladura en la Cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar se realizó en dos frentes: un primer frente denominado como Zona 1, en la cual no existía desarrollo previo y un segundo frente como Zona 2, donde ya existía desarrollo minero.

f) Descripción de la Zona 1

Esta zona se caracteriza por carecer de desarrollo minero previo, y encontrarse con un afloramiento intacto, en forma de domo rodeado de material arcilloso estéril, Figura 7. Por las características geológicas de dicha zona, se asume que la roca es intacta y masiva, en virtud que no ha sido alterada por procesos de voladura y ser un una roca ígnea.



Figura 7: Zona 1 de voladura en Cantera Bolívar
(Elaboración propia)

g) Descripción de la Zona 2

Esta zona se caracteriza por poseer desarrollo minero previo, con un frente libre bien desarrollado y una roca medianamente fracturada. Además, existe la presencia de sobretamaños superiores a los 3 metros de diámetros de voladuras anteriores dispersos en el piso de trabajo inferior. Este frente se observa en la Figura 8.





Figura 8: Visualización de los sobretamaños de la Zona 2 Cantera Bolívar
(Elaboración propia)

3.3.1.3 FV en la Cantera Cantaca C.A.

El área de voladura se encuentra en la parte más elevada del yacimiento, donde aflora un esquisto que es considerado como estéril para el proceso productivo de la empresa y que se encuentra por encima del material aprovechable. El área tiene la característica de ser irregular, con un frente libre distintivo y una roca medianamente fracturada por procesos de voladura anteriores y por la característica metamórfica de la roca. Dicha área de trabajo se puede observar en la Figura 9.



Figura 9: Área de voladura Cantera Cantaca
(Elaboración propia)

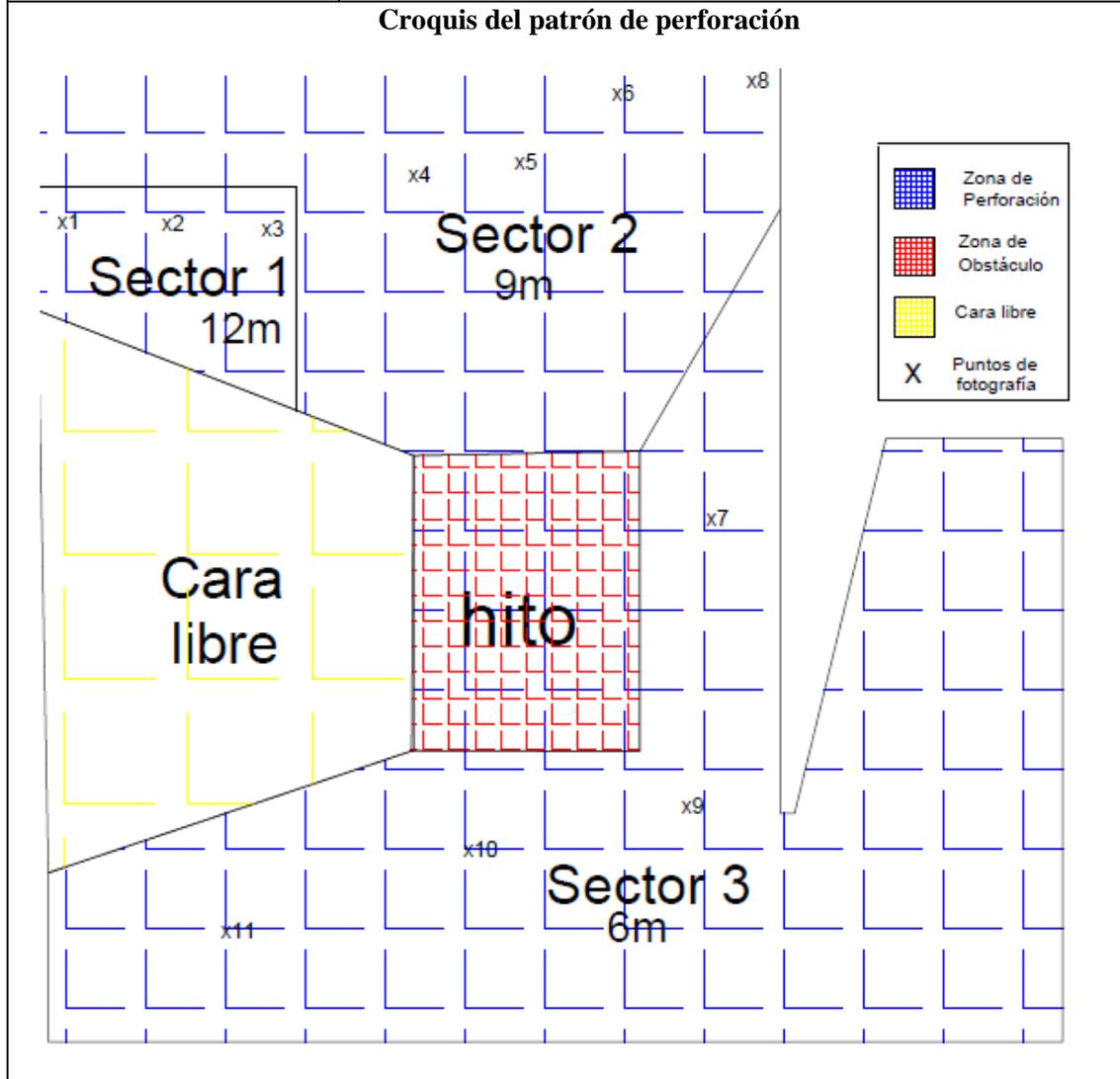
3.3.2 Guía de Observación para día de Voladura

Basados en la información geológica de la zona y de la ejecución de la operación unitaria de arranque indirecto, luego del proceso de voladura, se procede al llenado de cada guía de observación para las canteras: Clarines, Bolívar y Cantaca. Estas guías se muestran en las tablas 16 a la 19, a continuación:

Tabla 16: Guía de Observación día de Voladura Cantera Constructora Pedeca C.A. Clarines

Lugar de la voladura: Cantera Clarines							
Fecha: 10/5/2016				Empresa: Constructora Pedeca C.A.			
Variables de la voladura				Esquema			
				1	2	3	4
Retiro (m)				3	3	3	
Espaciamiento (m)				3	3	3	
Profundidad del barreno (m)				12	9	6	
Taco (m)				2,5	2,5	2,5	
Diámetro del barreno (pulg)				31/2	31/2	31/2	
Volumen a volar (m ³)				216	16200	6372	
Número de barrenos				32	200	118	
Carga de fondo tipo: 65x400				2	1	0	
Carga de columna (tipo de explosivo usado)				43	27	13	
Factor de carga (kg/m ³)				0.42	0.37	0.24	
Costo de ANFO (Bs)				2216	sacos		kg
Costo por emulsión (Bs)				7241	cajas		kg
Costo de perforación por metro lineal (Bs)				2000			
Costo total de accesorio por barreno (Bs)							
Condiciones Geológicas							
Condiciones de la cara libre	Bien perfilado	()	Con obstáculos	(x)	No existe	()	
Sistemas de diaclasa	Roca intacta	()	Medianamente fracturada	(x)	Muy fracturada	()	
Piso de trabajo	Horizontal	()	Inclinado	()	Irregular	(x)	
Sentido de la detonación	Mismo sentido a la foliación	()	Sentido contrario a la foliación	()	Desconocido	(x)	
Tipo de roca	Caliza	(x)	Arenisca	()	Mármol	()	
	Dolomita	()	Esquisto	()	Gabro	()	
	Granito	()	Cuarcita	()	Otro:	()	
Características del Esquema							
Barrenos tapados	Existencia	si (x)	no ()	Cantidad	10		
Barrenos cortos	Existencia	si (x)	no ()	Cantidad	20		
Barrenos con agua	Existencia	si ()	no (x)	Cantidad			
Barrenos desviados	Existencia	si ()	no (x)	Cantidad			
Barrenos con cavernas	Existencia	si (x)	no ()	Cantidad	20		
Sobre tamaños previos	Existencia	si (x)	no ()	Cantidad	100		

					Diámetro	3 m
Material del taco	Detritus	()	Piedra picada			(x)
Características de la perforación	Tresbolillo	()	Cuadrada	()	Mixta	()
Observaciones adicionales						
Condiciones climáticas	Sin ocurrencias por mal clima					
Otras observaciones referentes a los esquemas	Presencia de una zona no perforada por difícil acceso					



(Elaboración propia)

Tabla 17: Guía de Observación día de Voladura Cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar frente 1

Lugar de la voladura: Cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar frente 1						
Fecha: 10/5/2016			Empresa: Constructora Pedeca C.A.			
Variables de la voladura		Esquema				
		1	2	3	4	
Retiro (m)		2.5	2.5	2.5	2.5	
Espaciamiento (m)		2.5	2.5	2.5	2.5	
Profundidad del barreno (m)		11,6	10,6	9,6	8,6	
Taco (m)		2,5	2	2	2	
Diámetro del barreno (pulg)		31/2	31/2	31/2	31/2	
Volumen a volar (m ³)		15950	132	118	8500	
Número de barrenos		22	2	2	160	
Carga de fondo (pz) tipo: 65x400		4	3	3	3	
Carga de columna (kg)		35	32	31	26	
Factor de carga (kg/m ³)		0,58	0,55	0,59	0,61	
Costo de ANFO por saco (Bs)		2.216	Saco			kg
Costo por emulsión por caja (Bs)		7.241	caja			kg
Costo de perforación por m lineal (Bs)		2000				
Costo total de accesorio por barreno (Bs)						
Condiciones Geológicas						
Condiciones de la cara libre	Bien perfilado	()	Con obstáculos	()	No existe	(x)
Sistemas de diaclasa	Roca intacta	(x)	Medianamente fracturada	()	Muy fracturada	()
Piso de trabajo	Horizontal	()	Inclinado	(x)	Irregular	()
Sentido de la detonación	Mismo sentido a la foliación	()	Sentido contrario a la foliación	()	Desconocido	(x)
Tipo de roca	Caliza	()	Arenisca	()	Mármol	()
	Dolomita	()	Esquistos	()	Gabro	()
	Granito	(x)	Cuarcita	()	Otro:	()
Características del Esquema						
Barrenos tapados	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
Barrenos cortos	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
Barrenos con agua	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
Barrenos desviados	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
Barrenos con cavernas	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
Sobre tamaños previos	Existencia	si () no (x)	Cantidad			
			Diámetro			
Material del taco	Detritus	()	Piedra picada			(x)
Características de la perforación	Tresbolillo	(x)	Cuadrada	()	Mixta	()

Observaciones adicionales	
Condiciones climáticas	Sin ocurrencias por mal clima
Otras observaciones referentes a los esquemas	
Croquis de la perforación	

(Elaboración propia)

Tabla 18: Guía de Observación día de Voladura Cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar frente 2

Lugar de la voladura: Cantera Constructora Pedeca C.A. Bolívar frente 2							
Fecha: 10/5/2016				Empresa: Constructora Pedeca C.A.			
Variables de la voladura				Esquema			
				1	2	3	4
Retiro (m)				2,5	2,5		
Espaciamiento (m)				2,5	2,5		
Profundidad del barreno (m)				11,6	8,6		
Taco (m)				2,5	2		
Diámetro del barreno (pulg)				31/2	3		
Volumen a volar (m ³)				6.017	2.4 72		
Número de barrenos				83	46		
Carga de fondo (pz) tipo: 65x400				4	3		
Carga de columna (kg)				37	26		
Factor de carga (kg/m ³)				0,59	0,6 1		
Costo de ANFO por saco (Bs)				2.216	Sacos		kg
Costo por emulsión por caja(Bs)				7.241	Cajas		kg
Costo de perforación por m lineal (Bs)				2000			
Costo total de accesorio por barreno (Bs)				2000			
Condiciones Geológicas							
Condiciones de la cara libre	Bien perfilado	(x)	Con obstáculos	()	No existe	()	
Sistemas de diaclasa	Roca intacta	()	Medianamente fracturada	()	Muy fracturada	(x)	
Piso de trabajo	Horizontal	(x)	Inclinado	()	Irregular	()	
Sentido de la detonación	Mismo sentido a la foliación	()	Sentido contrario a la foliación	()	Desconocido	(x)	
Tipo de roca	Caliza	()	Arenisca	()	Mármol	()	
	Dolomita	()	Esquisto	()	Gabro	()	
	Granito	(x)	Cuarcita	()	Otro:	()	
Características del Esquema							
Barrenos tapados	Existencia	si	()	no	(x)	Cantidad	
Barrenos cortos	Existencia	si	()	no	(x)	Cantidad	
Barrenos con agua	Existencia	si	()	no	(x)	Cantidad	
Barrenos desviados	Existencia	si	()	no	(x)	Cantidad	
Barrenos con cavernas	Existencia	si	()	no	(x)	Cantidad	
Sobre tamaños previos	Existencia	si	(x)	no	()	Cantidad	100
						Diámetro	3 m
Material del taco	Detritus		()		Piedra picada		(x)
Características de la perforación	Tresbolillo		(x)		Cuadrada	()	Mixta ()

Observaciones adicionales	
Condiciones climáticas	Sin ocurrencias por mal clima
Otras observaciones referentes a los esquemas	
Croquis de la perforación	
<p>El diagrama muestra un croquis de perforación sobre una cuadrícula. Se dividen en tres sectores: Sector 1 (11.60 m), Sector 2 (11.60 m) y Sector 3 (8.60 m). El Sector 3 está sombreado en rojo y etiquetado como 'Zona de Obstáculo'. Los sectores 1 y 2 están sombreados en azul y etiquetados como 'Zona de Perforación'. El resto del área está sombreada en amarillo y etiquetada como 'Cara libre'. Se indican puntos de fotografía con 'x' en las coordenadas x1, x2, x3, x4, x5, x6 y x7. Una leyenda en la parte inferior derecha define los colores y el símbolo 'x'.</p>	

(Elaboración propia)

Tabla 19: Guía de Observación día de Voladura Canteras Cantaca

Lugar de la voladura: Canteras Cantaca C.A.							
Fecha: 10/5/2016				Empresa: Cantaca C.A.			
Variables de la voladura				Esquema			
				1	2	3	4
Retiro (m)				3	3	3	
Espaciamiento (m)				3,5	3,5	3,5	
Profundidad del barreno (m)				12	10	6	
Taco (m)				2,5	2	2	
Diámetro del barreno (pulg)				3	3	3	
Volumen a volar (m ³)				18.396	3.150	5.103	
Número de barrenos				146	30	81	
Carga de fondo (pz) Tipo: 65x400				2	1	1	
Carga de columna (kg)				31	27	13	
Factor de carga (kg/m ³)				0,26	0,38	0,20	
Costo de ANFO por saco (Bs)				2.216	sacos		kg
Costo por emulsión por caja(Bs)				7.241	cajas		kg
Costo de perforación por m lineal(Bs)				2000			
Costo total de accesorio por barreno(Bs)							
Condiciones Geológicas							
Condiciones de la cara libre	Bien perfilado	(x)	Con obstáculos	()	No existe	()	
Sistemas de diaclasa	Roca intacta	()	Medianamente fracturado	(x)	Muy fracturado	()	
Piso de trabajo	Horizontal	()	Inclinado	()	Irregular	(x)	
Sentido de la detonación	Mismo sentido a la foliación	()	Sentido contrario a la foliación	()	Desconocido	(x)	
Tipo de roca	Caliza	()	Arenisca	()	Mármol	()	
	Dolomita	()	Esquisto	(x)	Gabro	()	
	Granito	()	Cuarcita	()	Otro:	()	
Características del Esquema							
Barrenos tapados	Existencia	si () no (x)	Cantidad				
Barrenos cortos	Existencia	si () no (x)	Cantidad				
Barrenos con agua	Existencia	si () no (x)	Cantidad				
Barrenos desviados	Existencia	si () no (x)	Cantidad				
Barrenos con cavernas	Existencia	si () no (x)	Cantidad				
Sobre tamaños previos	Existencia	si () no (x)	Cantidad	100			
			Diámetro	3 m			
Material del taco	Detritus	()	Piedra picada			(x)	
Características de la perforación	Tresbolillo	(x)	Cuadrada	()	Mixta	()	

Observaciones adicionales	
Condiciones climáticas	Sin ocurrencias por mal clima
Otras observaciones referentes a los esquemas	

Croquis de la perforación

(Elaboración propia)

3.3.3 Análisis visual posterior a la voladura

En esta sección se presenta el análisis detallado posterior a la voladura, en conjunto con las Guías de observación para el control de cada una de las voladuras que componen al sujeto de estudio.

3.3.3.1 Cantera Clarines

En cuanto a la evaluación visual de la fragmentación, se observa en la Figura 12 que la presencia de sobretamaño puede catalogarse entre 5 y 10 % del volumen total. Si bien en las fotografías no se evidencia gran presencia de sobre tamaños, se conoce la existencia de barrenos tapados, barrenos cortos y con cavernas, lo cual aumenta la probabilidad de aparición del porcentaje de sobre-tamaños en las zonas indicadas con estas características.



Figura 12: Fragmentación Cantera Clarines

(Elaboración propia)

Por su parte, el desplazamiento de la voladura, como se observa en la Figura 24 que no fue superior a los 10 m. Este fenómeno se debe a la presencia de los obstáculos observados en el frente libre, aumentado a una zona denominada como el “hito” que influyó negativamente en el correcto desarrollo de la secuencia de detonación.

En cuanto al esponjamiento, como se observó en la Figura 12 y Figura 13 que por efecto del esponjamiento se alcanza una altura aproximada de 5 m, hecho que puede catalogarse como normal y esta falta de esponjamiento puede estar asociada a las

condiciones de inexistente cara libre, la cual puede afectar la secuencia de detonación al impedir que exista el espacio necesario para que el material pueda desplazarse y esponjarse.



Figura 13: Esponjamiento Cantera Clarines
(Elaboración propia)

3.3.3.2 Cantera Bolívar Frente 1

En cuanto a la evaluación visual de la fragmentación, en la Figura 14 se observa que la voladura es posible catalogarla con un 5-10% de sobre-tamaño, en vista que sólo una zona con fragmentación superior a los 2 m de diámetro. Es resto del material posee una granulometría gruesa en la parte superior, pero de mejor fragmentación en la parte inferior de la pila.





Figura 14: Evaluación del sobretamaño Constructora Pedeca C.A. Bolívar
(Elaboración propia)

En cuanto al desplazamiento, en la Figura 15 que, a pesar de no contar con frente libre, la voladura desplazó aproximadamente 7 m, ocupando el espacio de la vía. Sobre la misma figura se observa que la pila alcanzó los 7 m de altura sobre su cota inicial, lo cual indica un buen esponjamiento.



Figura 15: evaluación del desplazamiento
(Elaboración propia)

3.3.3.3 Cantera Bolívar Frente 2

En la Figura 16 se observa en cuanto a la fragmentación, una presencia de sobre-tamaños del 5 al 10 % del volumen total, mayormente en los laterales de la voladura. En la zona media de la pila este porcentaje se ve disminuido al no presentar una significativa cantidad de sobre-tamaños.



Figura 16: Evaluación del sobretamaño

(Elaboración propia)

En la Figura 17 se observa respecto al desplazamiento y el esponjamiento, que puede ser catalogado como bueno para ambos parámetros, catalogado así por el ingeniero encargado de la cantera.



Figura 17: Evaluación de esponjamiento y desplazamiento

(Elaboración propia)

3.3.3.4 Cantera Cantaca

En la figura 18 se observa la inexistencia de sobre-tamaños, este resultado podemos considerarlos como “buena fragmentación” debido a que el porcentaje de estos grandes tamaños es inferior al 5 % del material volado. Por su parte los parámetros relativos al desplazamiento y esponjamiento no son notables en este caso. Cabe destacar que la presencia de material fino en suspensión aérea obstaculizó el proceso del registro fotográfico posterior.

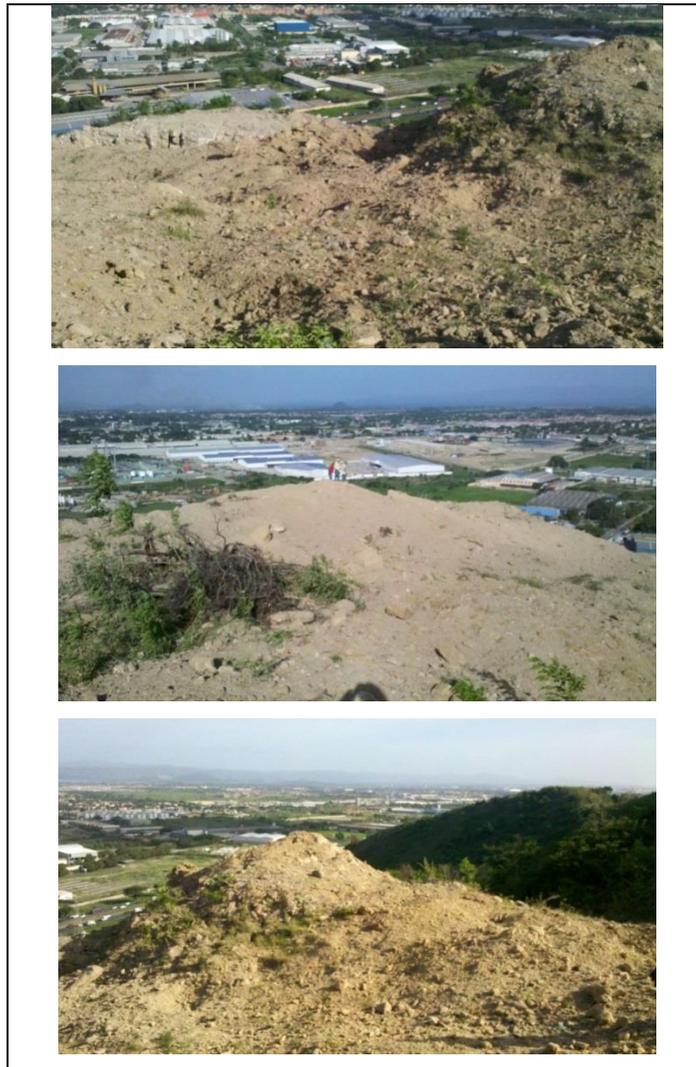


Figura 18: Resultado posterior a la voladura Cantaca
(Elaboración propia)

3.3.4 Llenado de las Guías de Observación para el Control de Voladuras

Basados en la información recolectada mediante fotografías y la evaluación visual, se procede al llenado la Guía de Observación para el Control para las canteras Bolívar, Clarines y Cantaca. Esta información puede observarse en las Tablas 20, 21, 22 y 23 a continuación:

Tabla 20: Guía de Observación para el Control Cantera Clarines

Lugar de la voladura: Cantera Constructora Pedeca C.A. Clarines				
Fecha: 10-5-2016		Empresa: Constructora Pedeca C.A.		
<u>Fragmentación</u>				
<u>Inspección visual de la voladura</u>			<u>Dimensiones del triturador primario y sobretamaño</u>	
Muy buena	0% De sobre tamaño	()	Admisión máxima (m)	1.30
Buena	0-5% De sobre tamaño	()	Admisión promedio (m)	0.90
Regular	5-10% De sobre tamaño	(x)	Dimensión de sobretamaño promedio (m)	
Mala	10-15% De sobre tamaño	()	Volumen de sobretamaño promedio (m ³)	
Muy mala	>15% De sobre tamaño	()	Toneladas de material procesadas en planta (opcional):	
Esponjamiento			Desplazamiento	
Muy bueno		()	Muy bueno	()
Bueno		()	Bueno	()
Regular		(x)	Regular	()
Malo		()	Malo	(x)
Muy malo		()	Muy malo	()
Altura final de la pila (m) (opcional)			Metros desplazados (opcional)	

(Elaboración propia)

Tabla 21: Guía de Observación para el Control Cantera Bolívar Frente 1

Lugar de la voladura: Constructora Pedeca C.A Bolívar Frente 1				
Fecha: 11-5-2016		Empresa: Constructora Pedeca C.A.		
<u>Fragmentación</u>				
<u>Inspección visual de la voladura</u>			<u>Dimensiones del triturador primario y sobretamaño</u>	
Muy buena	0% De sobre tamaño	()	Admisión máxima (m)	1.1
Buena	0-5% De sobre tamaño	()	Admisión promedio (m)	0.9
Regular	5-10% De sobre tamaño	(x)	Dimensión de sobretamaño promedio (m)	
Mala	10-15% De sobre tamaño	()	Volumen de sobretamaño promedio (m ³)	
Muy mala	>15% De sobre tamaño	()	Toneladas de material procesadas en planta (opcional):	
Esponjamiento			Desplazamiento	
Muy bueno		()	Muy bueno	()
Bueno		(x)	Bueno	(x)

Regular	()	Regular	()
Malo	()	Malo	()
Muy malo	()	Muy malo	()
Altura final de la pila (m) (opcional)	7	Metros desplazados (opcional)	7

(Elaboración propia)

Tabla 22: Guía de Observación para el Control Cantera Bolívar Frente 2

Lugar de la voladura: Constructora Pedeca C.A. Bolívar Frente 2			
Fecha: 11-5-2016		Empresa: Constructora Pedeca C.A.	
<u>Fragmentación</u>			
<u>Inspección visual de la voladura</u>			<u>Dimensiones del triturador primario y sobretamaño</u>
Muy buena	0% De sobre tamaño	()	Admisión máxima (m) 1.1
Buena	0-5% De sobre tamaño	()	Admisión promedio (m) 0.9
Regular	5-10% De sobre tamaño	(x)	Dimensión de sobretamaño promedio (m)
Mala	10-15% De sobre tamaño	()	Volumen de sobretamaño promedio (m ³)
Muy mala	>15% De sobre tamaño	()	Toneladas de material procesadas en planta (opcional):
Esponjamiento			Desplazamiento
Muy bueno		()	Muy bueno ()
Bueno		(x)	Bueno (x)
Regular		()	Regular ()
Malo		()	Malo ()
Muy malo		()	Muy malo ()
Altura final de la pila (m) (opcional)		10	Metros desplazados (opcional) 10

(Elaboración propia)

Tabla 23: Guía de observación para el control Cantera Cantaca

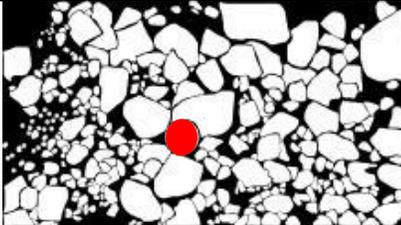
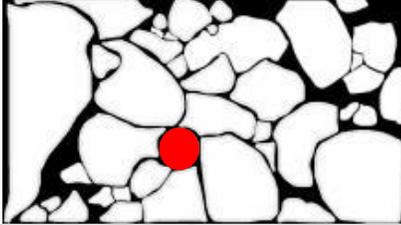
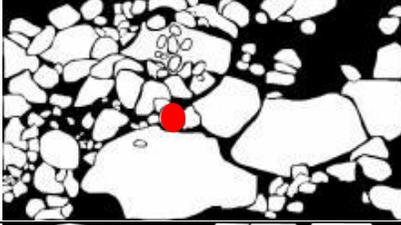
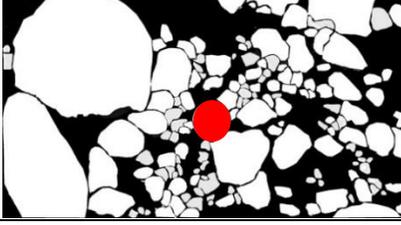
Lugar de la voladura: Cantaca			
Fecha: 11-5-2016		Empresa: Cantaca C. A.	
<u>Fragmentación</u>			
<u>Inspección visual de la voladura</u>			<u>Dimensiones del triturador primario y sobretamaño</u>
Muy buena	0% De sobre tamaño	()	Admisión máxima (m) 0.34
Buena	0-5% De sobre tamaño	(x)	Admisión promedio (m)
Regular	5-10% De sobre tamaño	()	Dimensión de sobretamaño promedio (m)
Mala	10-15% De sobre tamaño	()	Volumen de sobretamaño promedio (m ³)
Muy mala	>15% De sobre tamaño	()	Toneladas de material procesadas en planta (opcional):
Esponjamiento			Desplazamiento
Muy bueno		()	Muy bueno ()
Bueno		()	Bueno ()
Regular		()	Regular ()
Malo		(x)	Malo (x)
Muy malo		()	Muy malo ()
Altura final de la pila (m) (opcional)		10	Metros desplazados (opcional) 10

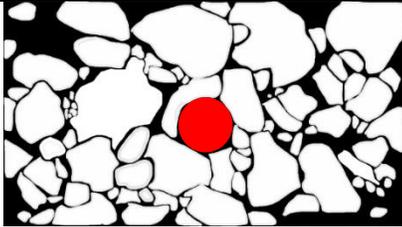
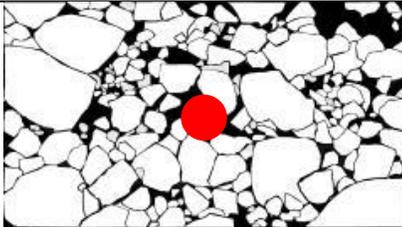
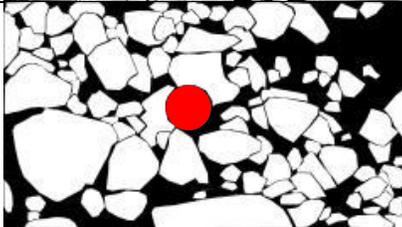
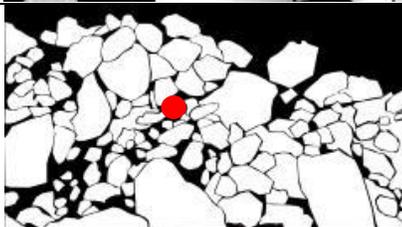
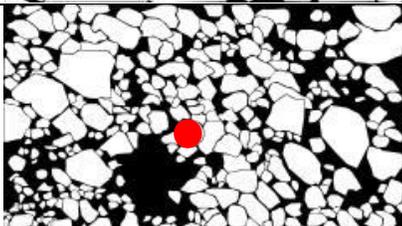
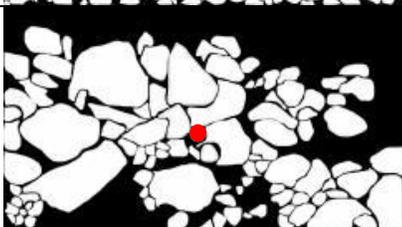
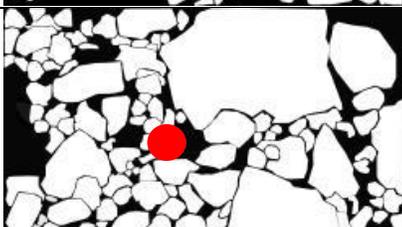
(Elaboración propia)

3.3.5 Análisis fotográfico posterior a las voladuras

El análisis fotográfico posterior a las voladuras se realiza mediante el registro fotográfico de campo. Dichas fotografías fueron escaladas mediante un balón estándar Tamanaco #3 de 15 cm de diámetro y fueron editadas de manera que los fragmentos de roca quedaran en color blanco, el entorno de color negro y el balón de color rojo. Dichas fotografías se presentan en la Tabla 23 para la Cantera Clarines, Tabla 24 para la Cantera Bolívar Frente 1, Tabla 25 para la Cantera Bolívar Frente 2 y Tabla 26 para la Cantera Cantaca.

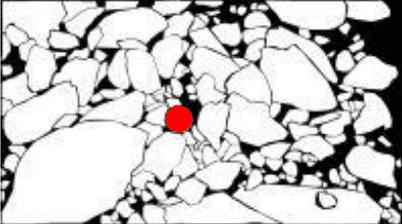
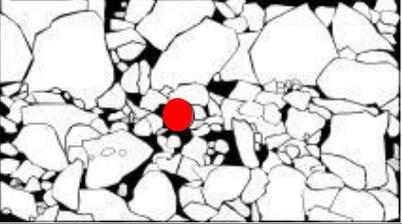
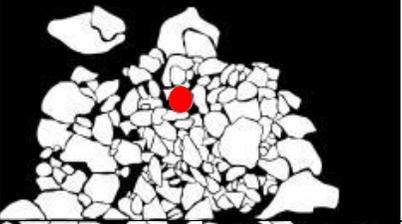
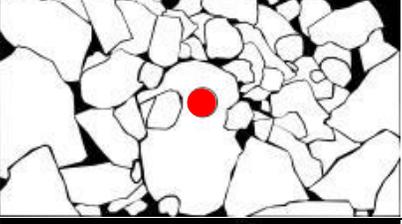
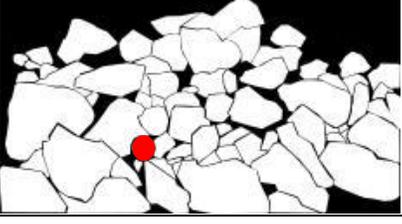
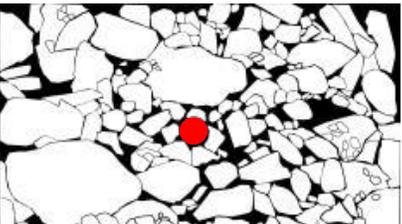
Tabla 23: Recolección y edición fotográfica Constructora Pedeca C.A. Cantera Clarines

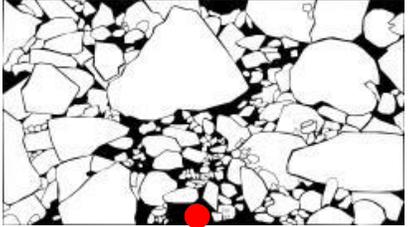
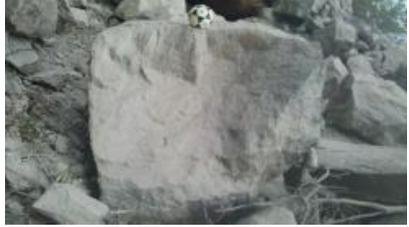
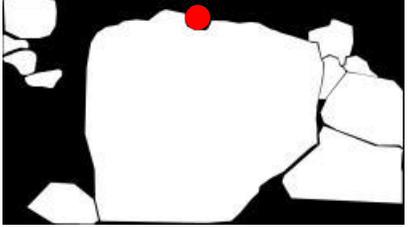
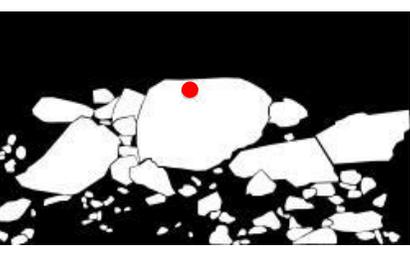
	Foto inicial	Fotografía fina
1		
2		
3		
4		

5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

(Elaboración propia)

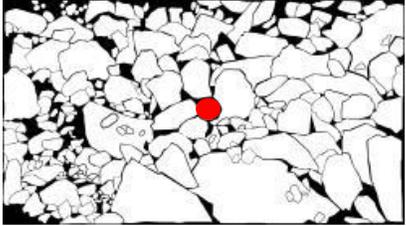
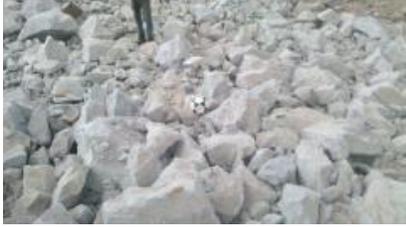
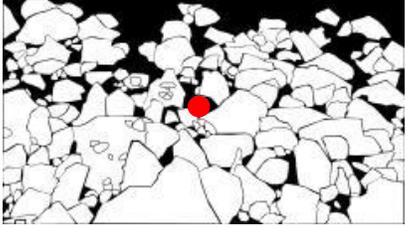
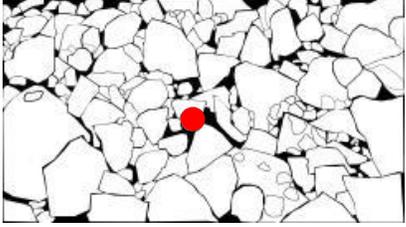
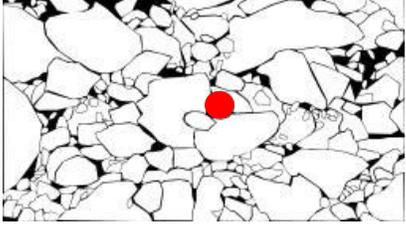
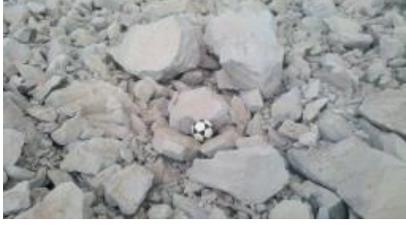
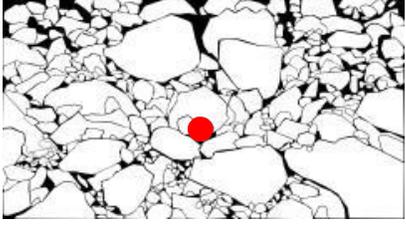
Tabla 24: Recolección y edición fotográfica Constructora Pedeca C.A. Cantera Bolívar Frente 1

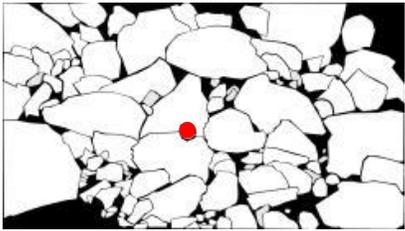
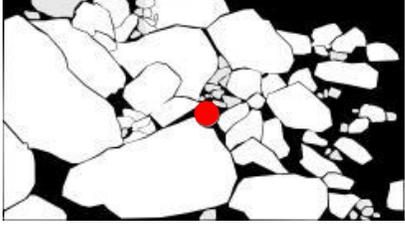
	Foto inicial	Fotografía fina
1		
2		
3		
4		
5		
6		

7		
8		
9		

(Elaboración propia)

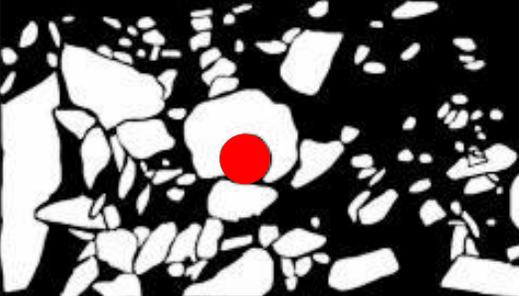
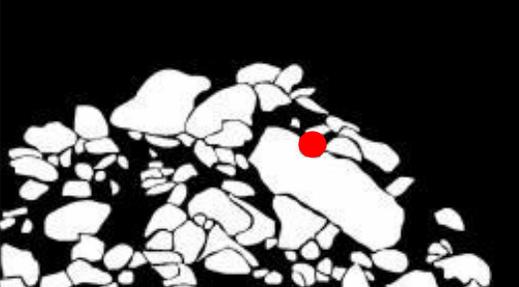
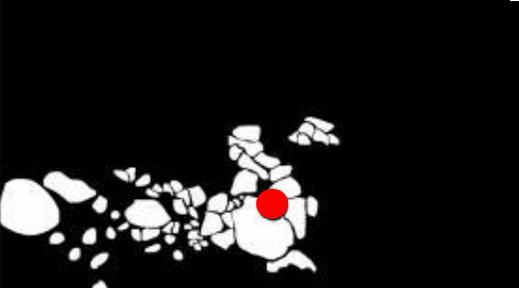
Tabla 25: Recolección y edición fotográfica Constructora Pedeca C.A. Cantera Bolívar Frente 2

	Foto inicial	Fotografía fina
1		
2		
3		
4		
5		

6		
7		

(Elaboración propia)

Tabla 26: Recolección y edición fotográfica Cantera Cantaca

	Foto inicial	Fotografía fina
1		
2		
3		
4		

(Elaboración propia)

3.4 Planteamiento de los algoritmos

Tras haber recopilado las teorías y los modelos que atendieran a las funciones requeridas por el *software*, se plantean siete algoritmos que resolvieran las operaciones necesarias de la manera siguiente:

3.4.1 Algoritmo para calcular un esquema de voladura según un autor seleccionado

1. Inicio
2. Leer la altura de banco.
3. Leer el diámetro del barreno.
4. Leer la inclinación del barreno.
5. Leer la roca a volar.
6. Leer el nombre del autor del postulado a usar para el cálculo del retiro.
7. Asignar los valores de resistencia a la compresión simple, densidad y velocidad sísmica de acuerdo a la roca indicada por el usuario.
8. Leer el explosivo usado.
9. Calcular el retiro según el autor seleccionado por el usuario. (Ecuaciones: 16, 17, 19, 21, 25)
10. Asignar el valor de la relación entre retiro y espaciamiento a partir del valor de resistencia a la compresión simple.
11. Calcular el espaciamiento (Ecuación 27)
12. Calcular el taco como 0,2 veces la altura del barreno.
13. Calcular la densidad de carga lineal de columna (Ecuación 18)
14. Si el tipo de explosivo usado es mixto
 - 14.1. Calcular la altura de fondo (Ecuación 32)
15. Sino
 - 15.1. Asignar a carga de fondo valor cero.
16. Calcular el valor de la altura de columna (Ecuación 33)
17. Llevar la altura de columnas a sacos de ANFO.
18. Recalcular el valor del taco en función de la nueva altura de columna.
19. Calcular el factor de carga (Ecuación 34)
20. Fin

3.4.2 Algoritmo para calcular una distribución granulométrica

1. Inicio
2. Leer la altura de banco.
3. Leer el diámetro del barreno.
4. Leer la inclinación del barreno.
5. Leer la roca a volar.
6. Leer la resistencia a la compresión simple.
7. Leer la densidad de la roca.
8. Leer el tipo explosivo.
9. Leer el retiro.
10. Leer el espaciamiento.
11. Leer el taco.
12. Leer la carga de columna.
13. Leer cantidad de cartuchos de emulsión de carga de fondo
14. Leer el nombre del autor del postulado a usar para el cálculo del k50.
15. Asignar los valores de factor de roca y constante de roca de acuerdo a la roca indicada por el usuario.
16. Asignar el valor de potencia relativa en peso del explosivo de acuerdo al explosivo indicado por el usuario.
17. Calcular la carga total
18. Calcular factor de carga
19. Calcular el k50 según el autor seleccionado por el usuario (Ecuaciones: 1, 3, 4,6)
20. Calcular el coeficiente de uniformidad (Ecuación 11)
21. Asignar al contador X el valor de 0.
22. Incrementar en una unidad el contador X.
23. Calcular el valor de cada pasante X mediante la ecuación de Weibull (Ecuación 8)
24. Si X es menor que 250
 - 24.1. Volver al paso 22.
25. Fin

3.4.3 Algoritmo del cálculo de un esquema de voladura en función del menor factor de carga que cumpla con un k50 cercano al deseado por el usuario

1. Inicio
2. Leer la altura de banco.
3. Leer el factor de roca.
4. Leer la constante de roca.
5. Leer la relación retiro espaciamento.
6. Leer el k50 deseado.
7. Leer el tipo de explosivo.
8. Si el explosivo es ANFO y emulsión
 - 8.1. Iniciar variable diámetro del barreno en 2 y media pulgadas.
 - 8.2. Incrementar la variable diámetro del barreno en media pulgada.
 - 8.3. Iniciar variable altura de fondo en 0 m.
 - 8.4. Incrementar la variable altura de fondo en 0,4 m.
 - 8.5. Inicializar la variable sobreperforación en 0,3 m.
 - 8.6. Incrementar la variable sobreperforación en 0,1 m.
 - 8.7. Iniciar variable taco en 0,7 m.
 - 8.8. Incrementar la variable taco en 0.1 m.
 - 8.9. Iniciar variable retiro en 1 m.
 - 8.10. Incrementar la variable retiro en 0,1 m.
 - 8.11. Calcular espaciamento (Ecuación 27)
 - 8.12. Calcular altura de columna (Ecuación 33)
 - 8.13. Calcular el coeficiente de uniformidad (Ecuación 11)
 - 8.14. Calcular el factor de carga (Ecuación 34)
 - 8.15. Calcular la carga total como la suma de la carga de fondo con la carga de columna.
 - 8.16. Calcular el k50 (Ecuaciones: 1, 3, 4,6)
 - 8.17. Si k50 es 7 unidades mayor o 7 unidades menor del k50 deseado
 - 8.17.1. Si el factor de carga es menor que el menor valor obtenido hasta el momento
 - 8.17.1.1. Generar esquema con los valores obtenidos
 - 8.18. Si retiro menor que 8
 - 8.18.1. Volver al paso 8.10.
 - 8.19. Si taco menor que 20 % de la altura del barreno
 - 8.19.1. Volver al paso 8.8.
 - 8.20. Si sobreperforación menor que 1 m
 - 8.20.1. Volver al paso 8.6.
 - 8.21. Si altura de fondo menor que 60 % de la altura del barreno

- 8.21.1. Volver al paso 8.4.
- 8.22. Si diámetro del barreno menor que 5 pulgadas
 - 8.22.1. Volver al paso 8.2.
- 8.23. Fin
- 9. Sino
 - 9.1. Iniciar variable diámetro del barreno en 2 y media pulgadas.
 - 9.2. Incrementar la variable diámetro del barreno en media pulgada.
 - 9.3. Iniciar variable altura de fondo en 0 m.
 - 9.4. Inicializar la variable sobreperforación en 0,3 m.
 - 9.5. Incrementar la variable sobreperforación en 0,1 m.
 - 9.6. Iniciar variable taco en 0,7 m.
 - 9.7. Incrementar la variable taco en 0.1 m.
 - 9.8. Iniciar variable retiro en 1 m.
 - 9.9. Incrementar la variable retiro en 0,1 m.
 - 9.10. Calcular espaciamiento (Ecuación 27)
 - 9.11. Calcular altura de columna (Ecuación 33)
 - 9.12. Calcular el coeficiente de uniformidad (Ecuación 11)
 - 9.13. Calcular el factor de carga (Ecuación 34)
 - 9.14. Calcular la carga total como la suma de la carga de fondo con la carga de columna.
 - 9.15. Calcular el K50 (Ecuaciones: 1, 3, 4,6)
 - 9.16. Si K50 es 7 unidades mayor o 7 unidades menor del k50 deseado
 - 9.16.1. Si el factor de carga es menor que el menor valor obtenido hasta el momento
 - 9.17.1.1. Generar esquema con los valores obtenidos
 - 9.17. Si retiro menor que 8
 - 9.17.1. Volver al paso 9.9.
 - 9.18. Si taco menor que 20% de la altura del barreno
 - 9.18.1. Volver al paso 9.7.
 - 9.19. Si sobreperforación menor que 1m
 - 9.19.1. Volver al paso 9.5.
 - 9.20. Si diámetro del barreno menor que 5 pulgadas
 - 9.20.1. Volver al paso 9.2.
- 10. Fin

3.4.4 Algoritmo del cálculo de un esquema de voladura en función del mayor coeficiente de uniformidad que cumpla con un k50 cercano al deseado por el usuario

1. Inicio
2. Leer la altura de banco.
3. Leer el factor de roca.
4. Leer la constante de roca.
5. Leer la relación retiro espaciamento.
6. Leer el k50 deseado.
7. Leer el tipo de explosivo.
8. Leer el coeficiente de uniformidad deseado.
9. Si el explosivo es ANFO y emulsión
 - 9.1. Iniciar variable diámetro del barreno en 2 y media pulgadas.
 - 9.2. Incrementar la variable diámetro del barreno en media pulgada.
 - 9.3. Iniciar variable altura de fondo en 0 m.
 - 9.4. Incrementar la variable altura de fondo en 0,4 m.
 - 9.5. Inicializar la variable sobreperforación en 0,3 m.
 - 9.6. Incrementar la variable sobreperforación en 0,1 m.
 - 9.7. Iniciar variable taco en 0,7 m.
 - 9.8. Incrementar variable taco en 0,1 m.
 - 9.9. Iniciar variable retiro en 1 m.
 - 9.10. Incrementar la variable retiro en 0,1 m.
 - 9.11. Calcular espaciamento. (Ecuación 27)
 - 9.12. Calcular altura de columna. (Ecuación 33)
 - 9.13. Calcular el coeficiente de uniformidad. (Ecuación 11)
 - 9.14. Calcular el factor de carga. (Ecuación 34)
 - 9.15. Calcular la carga total como la suma de la carga de fondo con la carga de columna.
 - 9.16. Calcular el K50. (Ecuaciones: 1, 3, 4,6)
 - 9.17. Si K50 es 7 unidades mayor o 7 unidades menor del k50 deseado
 - 9.17.1. Si el coeficiente de uniformidad calculado es más cercano que el valor más cercano obtenido hasta el momento
 - 9.17.1.1. Generar esquema con los valores obtenidos
 - 9.18. Si retiro menor que 8
 - 9.18.1. Volver al paso 9.10.
 - 9.19. Si taco menor que 20% de la altura del barreno
 - 9.19.1. Volver al paso 9.8.

- 9.20. Si sobreperforación menor que 1m
 - 9.20.1. Volver al paso 9.6.
- 9.21. Si altura de fondo menor que 60% de la altura del barreno
 - 9.21.1. Volver al paso 9.4.
- 9.22. Si diámetro del barreno menor que 5 pulgadas
 - 9.22.1. Volver al paso 9.2.
- 9.23. Fin.
- 10. Sino
 - 10.1. Iniciar variable diámetro del barreno en 2 y media pulgadas.
 - 10.2. Incrementar la variable diámetro del barreno en media pulgada.
 - 10.3. Iniciar variable altura de fondo en 0 m.
 - 10.4. Inicializar la variable sobreperforación en 0,3 m.
 - 10.5. Incrementar la variable sobreperforación en 0,1 m.
 - 10.6. Iniciar variable taco en 0,7 m.
 - 10.7. Incrementar variable taco en 0,1 m.
 - 10.8. Iniciar variable retiro en 1 m.
 - 10.9. Incrementar la variable retiro en 0,1 m.
 - 10.10. Calcular espaciamiento. (Ecuación 27)
 - 10.11. Calcular altura de columna. (Ecuación 33)
 - 10.12. Calcular el coeficiente de uniformidad. (Ecuación 11)
 - 10.13. Calcular el factor de carga. (Ecuación 34)
 - 10.14. Calcular la carga total como la suma de la carga de fondo con la carga de columna.
 - 10.15. Calcular el K50. (Ecuaciones: 1, 3, 4,6)
 - 10.16. Si K50 es 7 unidades mayor o 7 unidades menor del k50 deseado
 - 10.16.1. Si el coeficiente de uniformidad calculado es más cercano que el valor más cercano obtenido hasta el momento
 - 10.17.1.1. Generar esquema con los valores obtenidos.
 - 10.17. Si retiro menor que 8
 - 10.17.1. Volver al paso 10.9.
 - 10.18. Si taco menor que 20% de la altura del barreno
 - 10.18.1. Volver al paso 10.7.
 - 10.19. Si sobreperforación menor que 1m
 - 10.19.1. Volver al paso 10.5.
 - 10.20. Si diámetro del barreno menor que 5 pulgadas
 - 10.20.1. Volver al paso 10.2.
- 11. Fin

3.4.5 Algoritmo del funcionamiento del BlastScheme

1. Inicio
2. Crear esquema de voladura en ventana “Creación”
3. Realizar la voladura en función del esquema generado
4. Registrar los resultados de la voladura en ventana “Registro”
5. Comparar los resultados reales en contraste con los teóricos en ventana “Control”.
6. Si los resultados no son satisfactorios
 - 6.1. Ajustar los parámetros de entrada en función de los resultados obtenidos.
 - 6.2. Volver a paso 2.
7. Sino
 - 7.1. Guardar variables de voladura optimizadas.
 - 7.2. Fin

3.4.6 Algoritmo del cálculo de confiabilidad del BlastScheme

1. Inicio
2. Leer los porcentajes pasantes teóricos.
3. Leer los porcentajes pasantes obtenidos del análisis fotográfico.
4. Leer el coeficiente de uniformidad teórico.
5. Leer el coeficiente de uniformidad obtenido del análisis fotográfico.
6. Calcular error relativo porcentual entre el coeficiente de uniformidad teórico y el registrado fotográficamente.
7. Calcular error relativo porcentual entre el k50 teórico y el k50 registrado fotográficamente.
8. Calcular el factor de corrección en función del error del coeficiente de uniformidad.
9. Fin

3.4.7 Algoritmo de una distribución granulométrica parcial de un archivo fotográfico editado

1. Inicio
2. Leer archivo.
3. Introducir en un vector los diámetros de los tamaños de roca del archivo.
4. Leer escala.
5. Convertir los valores del vector de pixeles a cm.
6. Determinar la cantidad de valores que contiene el vector.
7. Llenar la tabla de marcas de clase.
8. Inicializar la tabla de frecuencia absoluta.
9. Inicializar la tabla de frecuencia relativa.
10. Inicializar la tabla de frecuencia relativa acumulada.
11. Colocar cada valor del vector en su clase respectiva.
12. Contabilizar la frecuencia absoluta para cada clase.
13. Calcular la frecuencia relativa para cada clase (Ecuación 14)
14. Calcular la frecuencia relativa acumulada para cada clase (Ecuación 15)
15. Buscar en la tabla de frecuencia relativa acumulada los valores cercanos a los pasantes k30, k40, k50, k60, k70 y k80.
16. Calcular el coeficiente de uniformidad (Ecuación 5)
17. Fin

3.5 Diseño de la interfaz de la adaptación del software BlastScheme

Para lograr el diseño de la interfaz que integrara los algoritmos y la información obtenida mediante los instrumentos de recolección de información en campo, se dividió el contenido por secciones de acuerdo a la función que se deseaba realizar. Para ello la interfaz cuenta con 4 ventanas principales, las cuales son: Creación, Registro, Monitoreo y Control. Adicionalmente, se agregaron 2 ventanas correspondientes al Menú Principal y Ayuda, a modo de facilitar al usuario el acceso a las ventanas y la comprensión de todos los términos y criterios empleados. A continuación, se expone el diseño de cada ventana.

3.5.1 Ventana: Menú Principal

En esta ventana se presenta al usuario una serie de íconos con acceso directo a todas las ventanas del programa, junto con un ícono de edición que permite editar un archivo pre-cargado en la ventana correspondiente a su fase de proyecto. Cada uno de estos íconos cuenta una imagen relacionada a la ventana destino, tal como se muestra en la Figura 19. Adicionalmente en esta ventana, al igual que en todas las siguientes, una barra de menú en el borde superior que permite acceder a todas las secciones del programa en el ítem Proyecto y que incluye los ítems Inicio y Ayuda, para dirigir a las ventanas de Menú Principal y Ayuda, respectivamente.



Figura 19. – Ventana: Menú Principal

(Elaboración propia)

3.5.2 Ventana: Creación

Esta ventana contiene una sección con pestañas, un gráfico, dos botones y dos cajas de texto. La caja de texto ubicada hacia la izquierda, presenta una pequeña descripción de la pestaña que esté activa para la modalidad de diseño, mientras que la caja de texto ubicada hacia la derecha muestra un resumen de los resultados obtenidos tras realizar los cálculos y el gráfico de los mismos. El botón de Ayuda despliega sobre la caja de texto de la derecha conceptos relacionados con el diseño de los *schemes* a modo informativo para el usuario, en caso de que desconozca alguna propiedad de los parámetros requeridos para el diseño.

La pestaña *Scheme 1* contiene dos tablas y un botón, tal como se muestra en la Figura 20. La primera tabla, está diseñada para recibir los parámetros iniciales básicos, mientras que la segunda tabla retorna el esquema de voladura generado, proceso que ocurre al presionar el botón “GENERAR SCHEME”, junto con la generación de la gráfica y el resumen.

El *Scheme 1* genera en primer lugar un esquema tomando como retiro el valor promedio de los autores tanto de retiro como de k50 (pasante del 50 % del material), sin embargo, este *scheme* permite cambiar ese valor promedio a uno en particular con tan sólo hacer *click* sobre el autor deseado, y adicionalmente, si se presiona el botón “Ver todas”, se muestran en pantalla todas las distribuciones modeladas por Weibull para los autores de k50: Kuznetsov, Larson, Chung, SveDeFo y el promedio. Es importante mencionar que la línea vertical que se genera en la gráfica, corresponde al tamaño máximo de admisión del triturador, por lo que su corte con la distribución granulométrica indica el porcentaje de sobre tamaño estimado para ese *scheme*.

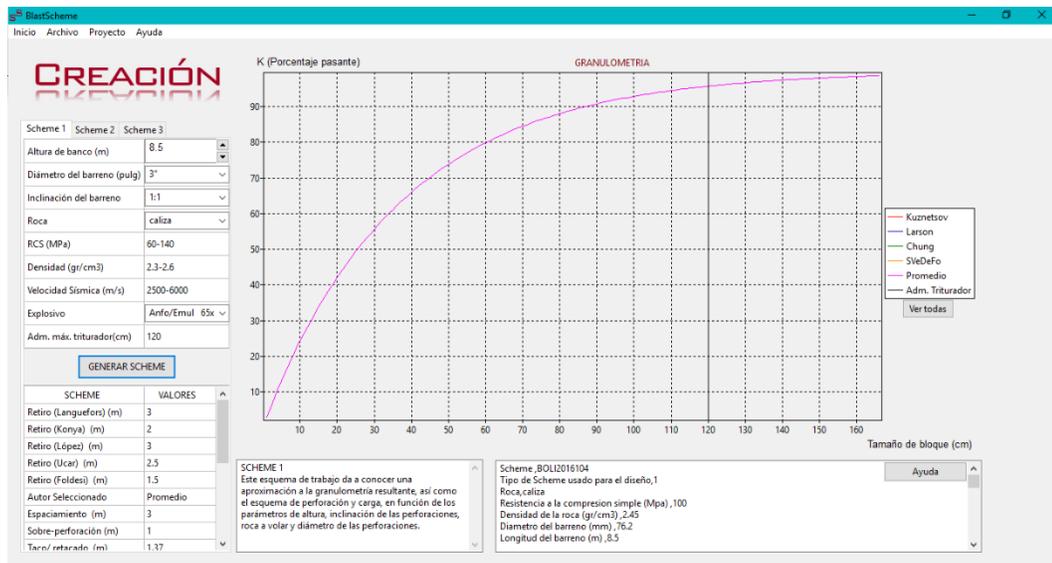


Figura 20. – Ventana: Creación. Pestaña: *Scheme 1*

(Elaboración propia)

La pestaña *Scheme 2*, contiene dos tablas y un botón, tal como se muestra en la Figura 21. La primera tabla, está diseñada para recibir los parámetros de la voladura con la restricción de que el contenido del barrenos no rebase o incumpla la capacidad de llenado del mismo, mientras que la segunda tabla retorna el esquema de voladura generado, proceso que ocurre al presionar el botón “ACTUALIZAR RESULTADOS”, junto con la generación de la gráfica y el resumen.

El *Scheme 2* genera en primer lugar un esquema tomando como k50 el valor promedio entre los autores, sin embargo, este *scheme* permite cambiar ese valor promedio a uno en particular con tan sólo hacer *click* sobre el autor deseado, y adicionalmente, si se presiona el botón “Ver todas”, se muestra en pantalla todas las distribuciones modeladas por Weibull para los autores de k50: Kuznetsov, Larson, Chung, SveDeFo y el promedio.

Es importante mencionar que la línea vertical que se genera en la gráfica, corresponde al tamaño máximo de admisión del triturador, por lo que su corte con la distribución granulométrica indica el porcentaje de sobre-tamaño estimado para ese *scheme*.

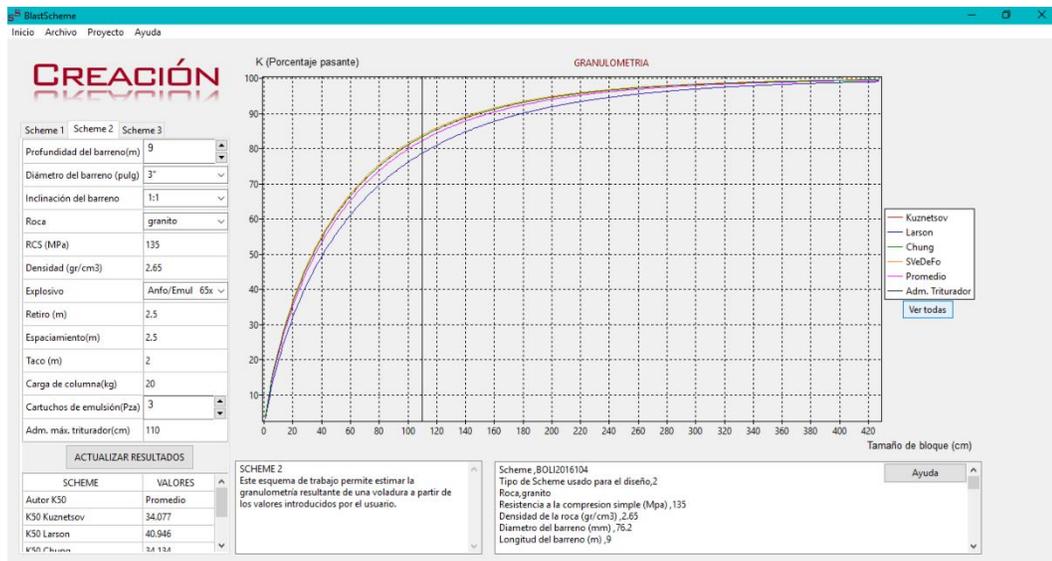


Figura 21. – Ventana: Creación. Pestaña: *Scheme 2*

(Elaboración propia)

La pestaña *Scheme 3*, presenta tres tablas, tres botones de funciones y cuatro botones de selección única, tal como se muestra en la Figura 22. La primera tabla, está diseñada para recibir los parámetros iniciales básicos de una voladura.

El *Scheme 3* contiene dos botones iniciales para la generación del *Scheme*, uno que conduce el proceso en función de la optimización del factor de carga, para reducir el uso de explosivo, y otro que conduce el proceso en función de la optimización del coeficiente de uniformidad. Ambos iniciadores terminan retornando los valores a la tabla 2.

Los botones de selección, permiten al usuario seleccionar con cuál de los autores quiere finalizar su *scheme*, tras lo cual al presionar el botón “Calcular”, se retornan los valores del esquema a la tabla 3, junto con la generación de la gráfica y el resumen.

Adicionalmente, si se presiona el botón “Ver todas”, se muestran en pantalla todas las distribuciones modeladas por Weibull para los autores de k50: Kuznetsov, Larson, Chung, SveDeFo y el promedio.

Es importante mencionar que la línea vertical que se genera en la gráfica, corresponde al tamaño máximo de admisión del triturador, por lo que su corte con la

distribución granulométrica indica el porcentaje de sobre tamaño estimado para ese *scheme*.

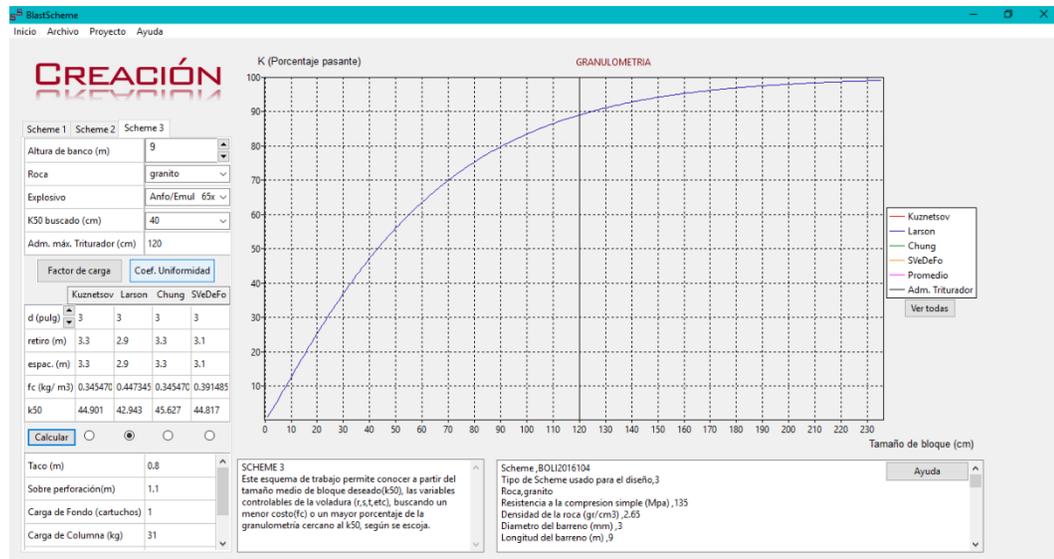


Figura 22. – Ventana: Creación. Pestaña: *Scheme 3*
(Elaboración propia)

3.5.3 Ventana: Registro

En esta ventana se presenta al usuario un formato digital de la guía de observación generada en el primer resultado, descritas a detalle en las tablas 14 y 15. El formato digital está dividido en 2 pestañas: la pestaña General y la pestaña Adicionales las cuales fueron diseñadas tal como se muestran en las Figura 23 y 24 respectivamente. En el diseño de estas pestañas se incluyeron elementos que permitieran practicidad al momento de ingresar la data, como los campos de llenado con *check* y las columnas ajustables al número de *schemes* usados. En general estas pestañas cumplen la función de recopilar los resultados de la voladura e incluirlos en un archivo histórico general para su posterior análisis.

REGISTRO

General Adicionales

CANTIDAD DE SCHEMES USADOS: 2 FECHA: 09/10/2016

VARIABLE		
Retiro (m)	2.5	2.5
Espaciamiento (m)	3	3
Profundidad del barreno (m)	9	7
Taco (m)	2	2
Diámetro del barreno (mm)	88.9	88.9
Volumen a volar (m ³)	1125	4200
Cantidad de barrenos	20	80
Carga de fondo (número de cartuchos)	3	2
Carga de columna (Kg)	20	20
Factor de carga (kg/m ³)	0.4	0.43
Tipo de emulsión usada	65 x 400	
Costo de la Emulsión (cartucho)	4000	
Costo del ANFO (kg)	1000	
Costo por perforación (metro lineal)	15000	
Costo de accesorios por barreno	2000	

REGISTRO
Esta sección permite al usuario ingresar los datos de la voladura realizada bajo los lineamientos del Scheme. Estos datos permiten al BlastScheme actualizar el registro de históricos y complementar la data que recibe la sección de Control.

Diámetro del barreno
Esta definido por el diámetro de la broca de perforación.

Espaciamiento
Distancia mas larga entre barrenos de una misma fila en una malla de perforación.

Taco
Volumen del barreno relleno de material inerte generalmente en superficie y que contiene la columna de gases de la detonación.

Figura 23. – Ventana: Registro – General
(Elaboración propia)

REGISTRO

General Adicionales

CARACTERÍSTICAS DEL FRENTE A VOLAR

Condiciones del frente libre: Bien desarrollado Con obstáculos No existe Material del taco Piedra picada

Sistemas de diaclasa: Roca intacta Medianamente fracturado Altamente fracturado Características de la perforación: Tresbolillo Cuadrada Mixta

Piso de trabajo: Horizontal Inclinado Irregular Sobretamaños previos: Cantidad Diámetro de sobretamaño

Sentido de la detonación: Mismo sentido de la foliación Sentido contrario de la foliación Desconocido Homogeneidad del frente: 1 sólo tipo de roca

FRAGMENTACIÓN **ESPONJAMIENTO** **DESPLAZAMIENTO**

Muy buena Mala Muy buena Mala Muy buena Mala Mala

Buena Muy mala Buena Muy mala Buena Muy mala

Regular K50 (opcional) 60 Regular Altura final de la pila(opc.) 11 Regular Metros desplazados(opc.) 2

OBSERVACIONES DE BARRENOS EN CAMPO **DIMENSIÓN DEL TRITURADOR PRIMARIO** **SOBRETAMAÑO VS TONELADAS PROCESADAS**

Barrenos tapados	Cantidad	3	Admisión máxima del triturador (m)	110	Diámetro promedio de sobretamaño obtenido(m3)	115
Barrenos cortos	Cantidad	2	Admisión promedio del triturador (m)	80	Toneladas de material procesadas en planta (opc.)	
Barrenos con agua	Cantidad	0				
Barrenos fuera del patrón	Cantidad	1				
Barrenos desviados	Cantidad	0				
Barrenos con presencia de cavernas	Cantidad	0				

REGISTRO
Esta sección permite al usuario ingresar los datos de la voladura realizada bajo los lineamientos del Scheme. Estos datos permiten al BlastScheme actualizar el registro de históricos y complementar la data que recibe la sección de Control.

Diámetro del barreno
Esta definido por el diámetro de la broca de perforación.

Espaciamiento
Distancia mas larga entre barrenos de una misma fila en una malla de perforación.

Figura 24. – Ventana: Registro – Adicionales
(Elaboración propia)

3.5.4 Ventana: Control

En esta ventana se presenta al usuario una tabla, un listado, dos botones, un gráfico y cuatro cajas de texto, tal como se observan en la Figura 25. El primer botón cuyo texto indica “Importar data fotográfica”, conduce a una ventana emergente que

permite cargar los datos del análisis fotográfico. Esta ventana emergente, cuenta con un campo numérico, para recibir el número de archivos que el usuario va a ingresar, un botón de seleccionar archivo, para indicar en qué carpeta del disco está ubicado, un campo numérico, para indicar la escala de conversión, un menú desplegable para indicar las unidades de la escala y un botón de “siguiente” para proceder a importar los datos, como es mostrado en la Figura 26.

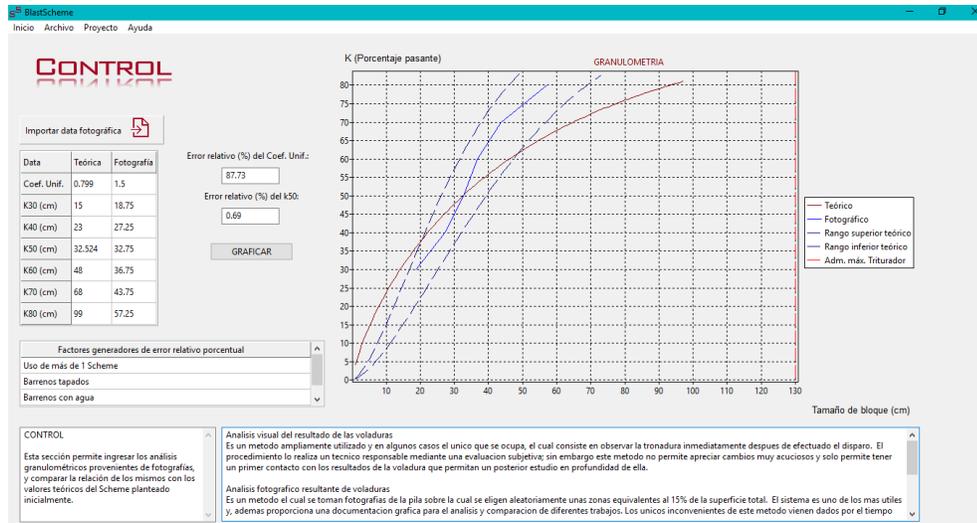


Figura 25. – Ventana: Control
(Elaboración propia)

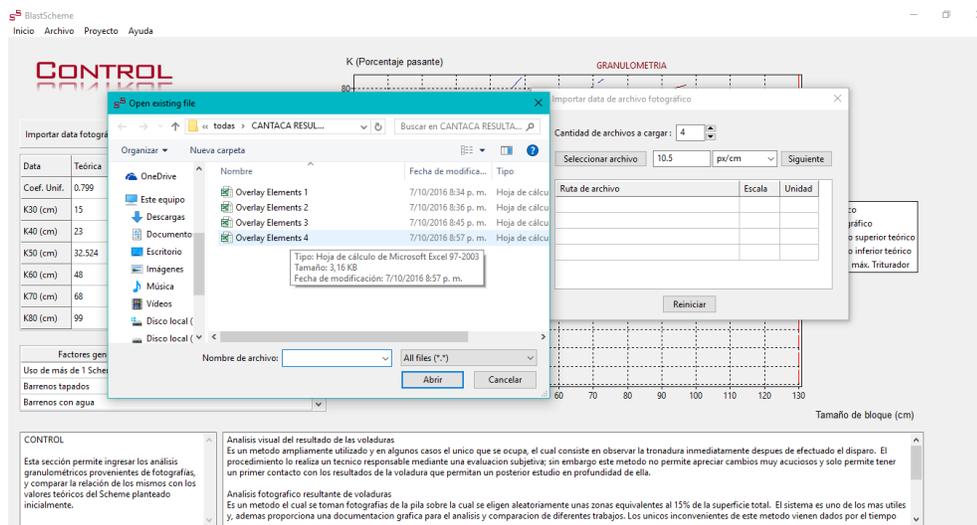


Figura 26. – Ventana: Control- Importar datos fotográficos
(Elaboración propia)

Una vez importada los datos del análisis fotográfico, el programa coloca los valores del coeficiente de uniformidad y los pasantes del 30 % al 80 % en la tercera columna de la tabla se calcula el error relativo porcentual entre dichos valores y los teóricos y lo coloca en las cajas correspondientes. La segunda columna es cargada de la data ingresada por el usuario en la ventana de Creación.

El botón “Graficar” utilizan los datos de la tabla para mostrar de manera gráfica la relación entre las distribuciones y el listado inferior a la tabla muestra las posibles causas del error relativo porcentual obtenido en función de la información guardada en el Registro del *scheme*.

3.5.5 Ventana: Monitoreo

En esta ventana se presenta al usuario cuatro botones, cuatro gráficos, cuatro menús desplegables y dos cajas de texto, tal como se muestra en la Figura 27. Los menús desplegables corresponden al tipo de información que se desea observar en el tiempo, dado que al hacer *click* sobre cualquiera de ellos, se genera una gráfica que muestra el valor que se ha obtenido de cada uno en la fecha en que fueron registrados. Igualmente, se visualiza en la parte inferior una pequeña sección de ayuda con los conceptos de cada botón, así como una sección en la esquina inferior izquierda que explica el funcionamiento de esta ventana.

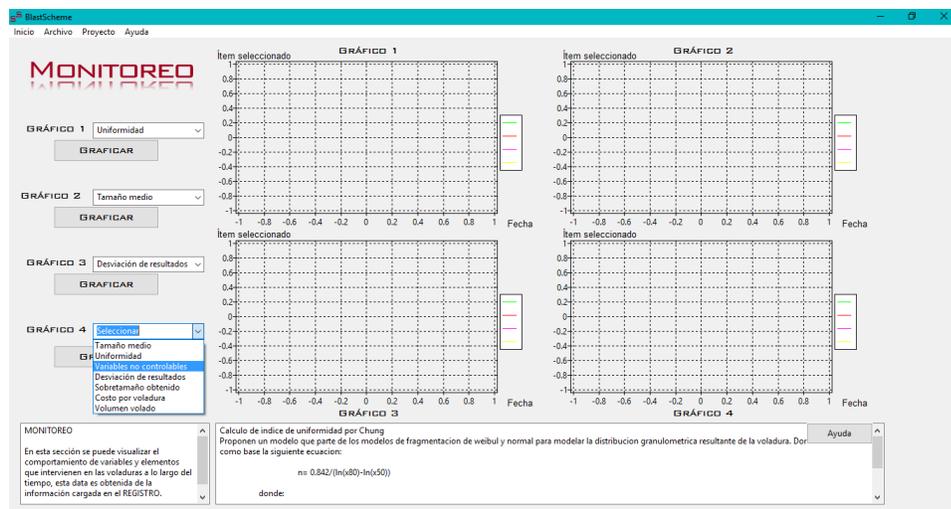


Figura 27. - Ventana: Monitoreo

(Elaboración propia)

3.5.6 Ventana: Ayuda

En esta ventana, se presenta al usuario tres cajas de texto, tal como se muestra en la Figura 28. La primera con capacidad para ingresar texto denominada buscador, la segunda con un listado de títulos de conceptos denominada índice y la tercera, con un listado de conceptos denominada conceptos encontrados.

La función de esta ventana radica en facilitar al usuario la búsqueda de conceptos relacionados a las dudas que pueda presentar al momento de utilizar el software. El método de búsqueda es muy sencillo, el cual consiste básicamente en introducir en el buscador el término del cual desea obtener información y presionar el botón “BUSCAR” o la tecla “ENTER”, e inmediatamente se mostrarán en índice todos los títulos relacionados a dicho término con los que cuente el *software* y se mostrará en conceptos encontrados la definición de los mismos. Otra manera de buscar la información deseada es hacer *click* sobre el título en el índice y de esta manera se mostrará la información en conceptos encontrados.

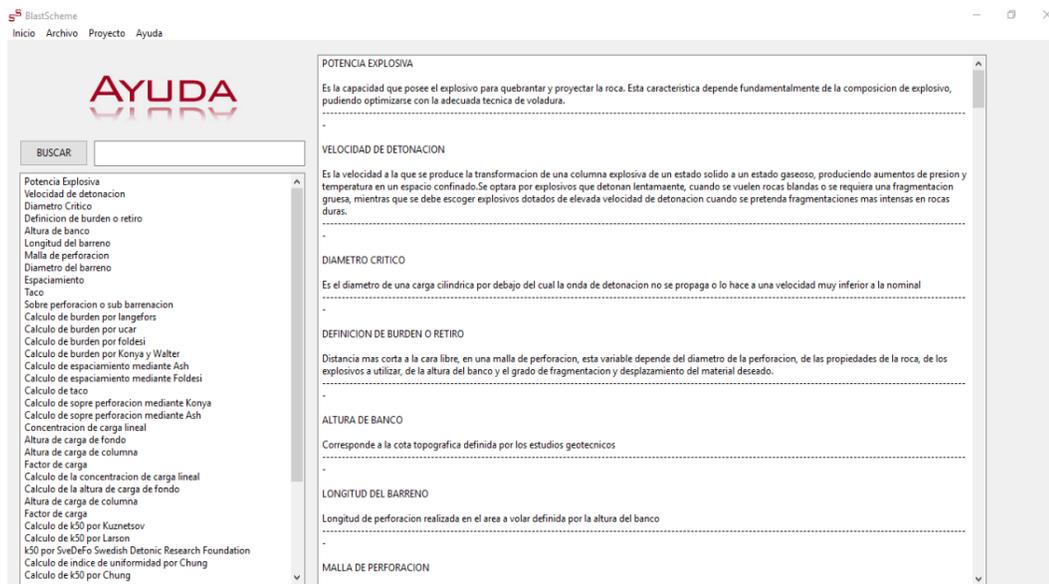


Figura 28.- Ventana: Ayuda

(Elaboración propia)

3.5.7 Análisis del diseño de la adaptación de la interfaz

En cuanto al diseño de la interfaz para lograr su adaptación a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras, se observa que este nuevo diseño cuenta con funciones que permiten al usuario visualizar sus resultados de forma gráfica, cuestión que adicionada en esta versión es capaz de trabajar con múltiples escenarios al mismo tiempo, al igual que permite registrar datos en el tiempo y exportarlos en formatos compatibles con otros programas.

3.6 Confiabilidad del software BlastScheme

Para lograr la validación del *software* BlastScheme se realiza una etapa previa de validación del *software* auxiliar *ImageJ*, el cual fue empleado para la generación de los datos reales a contrastar con los datos teóricos del BlastScheme.

3.6.1 Validación del ImageJ

La validación del *software* conexo *ImageJ* se realiza siguiendo el método propuesto para la misma. El material a trabajar para este proceso es un meta gabro extraído de la cantera Constructora Pedeca C.A. El Turpial, el cual se usa como material de control.

De una muestra de 20 kg de material bruto de mina, se obtuvieron 4 muestras representativas de 2 kg cada una, catalogadas como las muestras A, B, C y D; tal como se observa en la Figura 29.

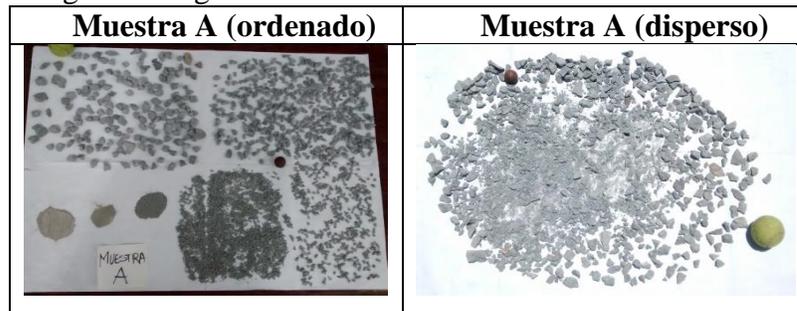


Figura 29: Muestras para el análisis
(Elaboración propia)

3.6.1.1 Captación y procesamiento de las imágenes

Siguiendo los protocolos de análisis planteados en el Marco Metodológico, se realizan dos registros fotográficos para las muestras. Un primer registro fotográfico al salir del triturador primario (material disperso) y un segundo registro fotográfico luego de tamizar la muestra y separarla por diámetros (material ordenado). Un ejemplo de ambos registros se puede ver en la Tabla 27 referente a la Muestra A.

Tabla 27: Registro fotográfico Muestra A



(Elaboración propia)

Posteriormente, se procesaron las imágenes captadas mediante el *software ImageJ*. Con estos datos se obtuvieron las tablas de distribución de frecuencias que se presentan en las Tabla 28, 29, 30 y 31, para las muestras dispersas y ordenadas. Dichas tablas presentan las clases del análisis (en cm), las marcas de clase para cada intervalo de clase, la frecuencia absoluta (freq absoluta), la frecuencia absoluta acumulada (freq absoluta acumulada) y la frecuencia relativa acumulada (Freq relativa acumulada).

Tabla 28: Tabla de distribución de frecuencias - Muestra A dispersa y ordenada

Clases (cm)		Ordenada			Dispersa		
		Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada	Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada
0	0,5	25,9	25,9	0,0	0,0	0,0	0,0
0,5	1,2	34,3	60,3	0,0	0,0	0,0	0,0
1,2	4,8	226,9	287,1	0,0	4.083,0	4.083,0	0,0
4,7	5,6	217,5	504,6	0,0	3.644,0	7.727,0	0,0
5,7	12,5	43.979,3	44.483,0	0,2	65.234,0	72.961,0	0,3
12,5	19	70.751,5	115.235,0	0,6	84.053,0	157.015,0	0,6
19,1	44,5	83.601,7	198.837,0	1,0	125.100,0	282.115,0	1,0
44,5	50,0	0,0	198.837,0	1,0	0,0	282.115,0	1,0
50,0	100,0	0,0	198.837,0	1,0	0,0	282.115,0	1,0

Total	198.837,1	Total	282.115,0
--------------	-----------	--------------	-----------

Tabla 29: Tabla de distribución de frecuencias – Muestra B dispersa y ordenada

Clases (cm)		Ordenada			Dispersa		
		Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada	Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada
0,0	0,2	12,1	12,1	0,0	5,4	5,4	0,0
0,2	0,5	47,0	59,2	0,0	11,8	11,8	0,0
0,5	1,2	214,7	273,9	0,0	2.658,1	2.669,91	0,0
1,2	4,7	328,7	602,5	0,0	2.195,3	4.865,2	0,0
4,7	5,6	28.576,0	29.178,6	0,2	46.870,1	51.735,3	0,2
5,7	12,5	76.323,0	105.501,0	0,6	79.573,2	131.308,5	0,5
12,5	19,0	61.826,6	167.328,0	1,0	113.883,2	245.191,7	1,0
19,1	44,5	0,0	167.328,21	1,0	0,0	245.191,7	1,0
Total		167.328,21			Total 245.191,73		

(Elaboración propia)

Tabla 30: Tabla de distribución de frecuencias Muestra C dispersa y ordenada

Clases (cm)		Ordenada			Dispersa		
		Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada	Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada
0,0	0,2	26,6	26,7	0,0	10,8	10,9	0,0
0,2	0,5	57,6	84,3	0,0	20,7	20,8	0,0
0,5	1,2	426,5	510,7	0,0	3.480,1	3.500,9	0,0
1,2	4,7	437,8	948,5	0,0	2.523,9	6.024,8	0,0
4,7	5,6	34.511,6	35.460,1	0,2	48.966,8	54.991,7	0,2
5,7	12,5	71.232,6	106.692,7	0,5	74.169,2	129.160,8	0,5
12,5	19,0	72.042,6	178.735,3	0,9	145.073,5	274.234,4	1,0
19,1	44,5	2.618,2	181.353,5	1,0	1.984,4	276.218,7	1,0
Total		181.353,5			Total 276.218,7		

(Elaboración propia)

Tabla 31: Tabla de distribución de frecuencias Muestra D dispersa y ordenada

Clases (cm)		Ordenada			Dispersa		
		Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada	Freq absoluta	Freq absoluta acumulada	Freq relativa acumulada
0	0,2	8,5	8,5	0,0	24,8	24,8	0,0
0,2	0,5	17,8	17,8	0,0	62,7	87,5	0,0
0,5	1,2	6.320,0	6.337,8	0,0	395,6	483,1	0,0
1,2	4,8	4.132,0	10.469,8	0,0	609,5	1.092,6	0,0
4,8	5,6	65.273,5	75.743,3	0,3	47.219,6	48.312,2	0,3
5,7	12,5	83.770,0	159.513,3	0,6	69.301,3	117.613,5	0,7
12,5	19	96.591,5	256.104,8	1,0	59.824,2	177.437,7	1,0
19,1	44,5	0,0	256.104,8	1,0	0,0	177.437,7	1,0

44,5	50	0	256.104,8	1,0		177.437,7	1,0
Total		256.104,8		Total	177.437,7		

(Elaboración propia)

3.6.1.2 Gráficas de distribución de frecuencias

La frecuencia relativa acumulada de las Tablas 28, 29, 30 y 31, están representadas en las Figuras 30, 31, 32 y 33 correspondiente a la muestra dispersa. En dichas figuras se presenta las gráficas de distribución de frecuencia de la fotografía en contraste con la distribución de frecuencia obtenida mediante una distribución de tipo Weibull.

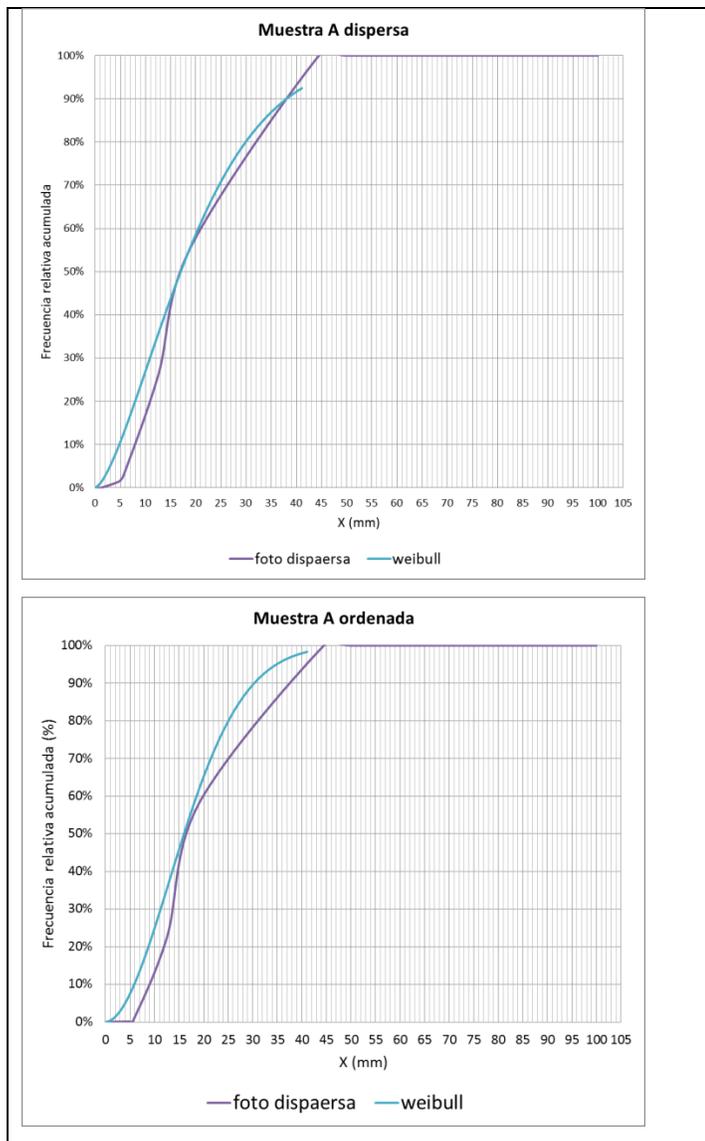


Figura 30: Gráfica de distribución de frecuencias Muestra A dispersa, ordenada y Weibull

(Elaboración propia)

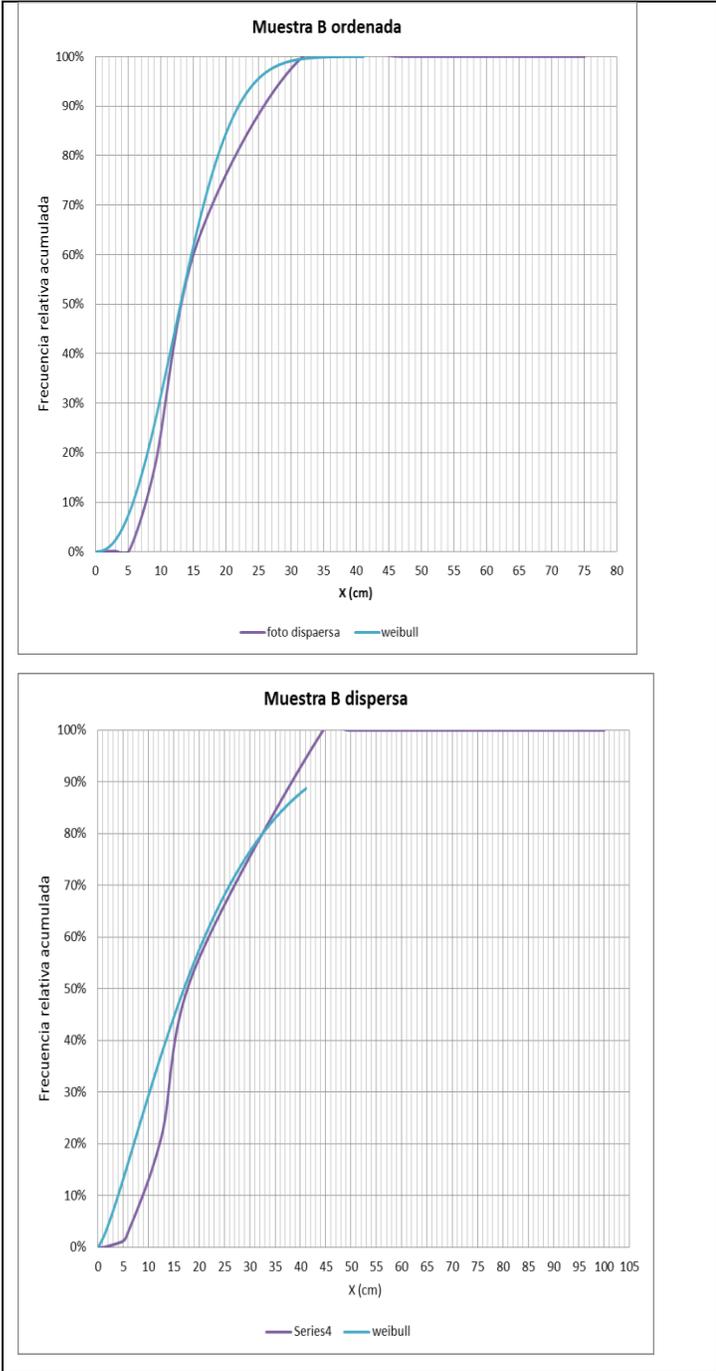


Figura 31: Gráfica de distribución de frecuencias Muestra B dispersa, ordenada y Weibull

(Elaboración propia)

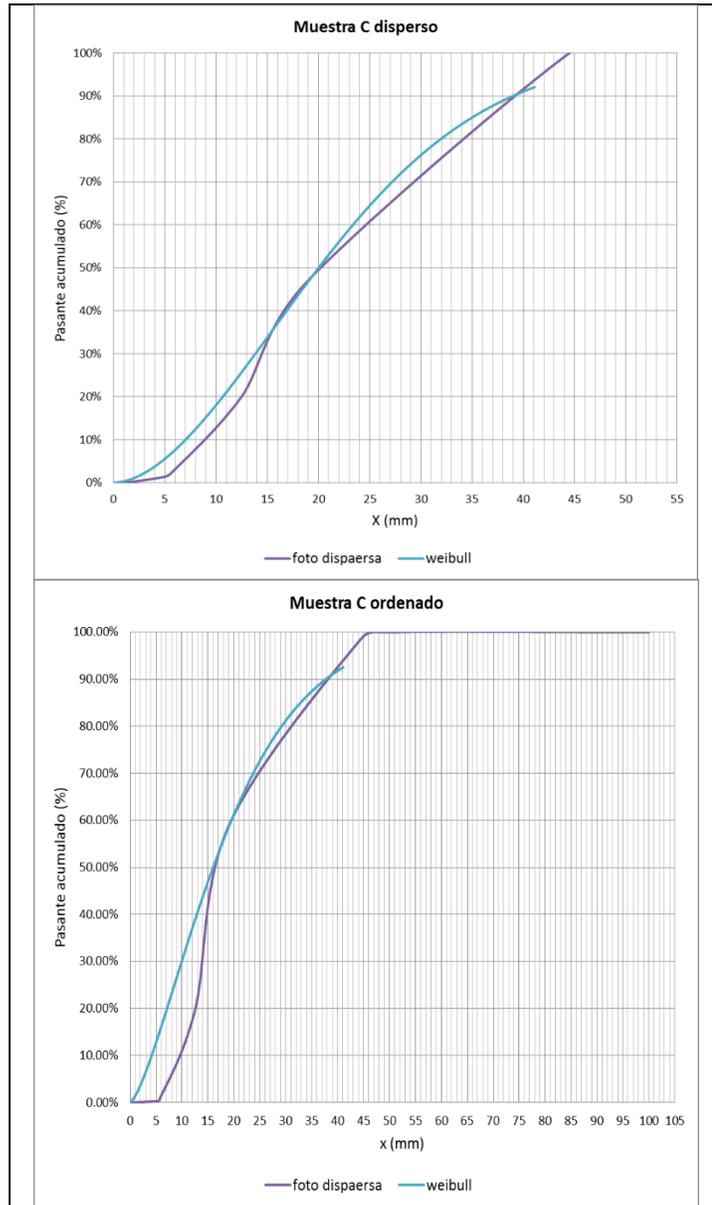


Figura 32: Gráfica de distribución de frecuencias Muestra C dispersa, ordenada y Weibull

(Elaboración propia)

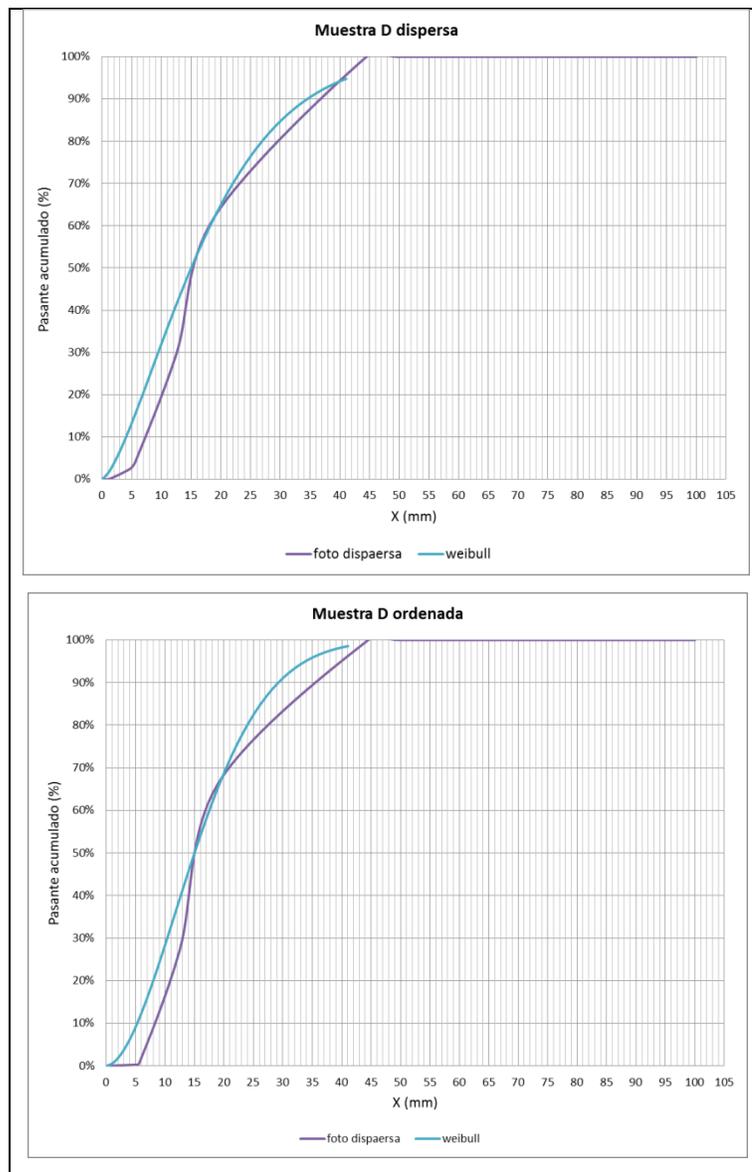


Figura 33: Gráfica de distribución de frecuencias Muestra D dispersa, ordenada y Weibull
(Elaboración propia)

h) Análisis de las gráficas de distribución de frecuencias

En las figuras 30, 31, 32 y 33 se puede determinar que la distribución granulométrica se encuentra concentrada entre 5 y 40 mm de diámetro para todas las muestras. De igual manera se muestra la capacidad que tiene la función Weibull de aproximar la distribución granulométrica obtenida mediante el análisis fotográfico, para de este modo suavizar el comportamiento de la curva.

3.6.1.3 Análisis granulométrico de las muestras

En esta sección se presenta el análisis granulométrico para las muestras A, B, C, y D, además de la comparación final entre los k_{50} y coeficientes de uniformidad para las muestras dispersas, ordenadas y reales.

i) Análisis granulométrico de las muestras

Del análisis granulométrico de las muestras A, B, C y D se obtienen las Tablas 32, 33, 34 y 35, donde se observan los tamices empleados con su dimensión en mm, las marcas de clase; el retenido en: gramos, porcentaje y acumulado en porcentaje; así como el porcentaje de pasante.

Tabla 32: Análisis granulométrico Muestra A

Tamiz	Abertura (mm)	Marca de clase	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
<pasa 200	0	0	0	0	100	0
pasa 200	0.038	0.0565	10	0.461	99.539	0.005
n°200	0.075	0.1125	5	0.231	99.308	0.007
n°100	0.15	0.325	5	0.231	99.077	0.009
n°35	0.5	0.84	150	6.922	92.155	0.078
n°16	1.18	2.965	290	13.383	78.772	0.212
n°4	4.75	5.175	110	5.076	73.696	0.263
n°3	5.6	9.05	690	31.841	41.855	0.581
½	12.5	15.75	850	39.225	2.630	0.974
¾	19	31.75	57	2.630	0.000	1.000
1 ¾	44.5	47.25	0	0.000	0.000	1.000
2	50	50	0	0.000	0.000	1.000
Total (g)			2167			

(Elaboración propia)

Tabla 33: Análisis granulométrico - Muestra B

Tamiz	Abertura (mm)	Marca de clase	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
< pasa 200	0	0	0	0	100	0
pasa 200	0.038	0.0565	10	0.501	99.499	0.005
n°200	0.075	0.1125	5	0.251	99.248	0.008
n°100	0.15	0.325	5	0.251	98.997	0.010
n°35	0.5	0.84	5	0.251	98.747	0.013
n°16	1.18	2.965	90	4.511	94.236	0.058
n°4	4.75	5.175	110	5.514	88.722	0.113
n°3	5.6	9.05	810	40.602	48.120	0.519
½	12.5	15.75	770	38.596	9.524	0.905
¾	19	31.75	190	9.524	0.000	1.000
1 ¾	44.5	47.25	0	0.000	0.000	1.000
2	50	50	0	0.000	0.000	1.000
Total (g)			1995			

(Elaboración propia)

Tabla 34: Análisis granulométrico - Muestra C

Tamiz	Abertura (mm)	Marca de clase	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
< pasa 200	0	0	0	0	100	0
pasa 200	0.038	0.0565	10	0.494	99.506	0.005
n°200	0.075	0.1125	5	0.247	99.259	0.007
n°100	0.15	0.325	5	0.247	99.012	0.010
n°35	0.5	0.84	5	0.247	98.765	0.012
n°16	1.18	2.965	80	3.951	94.815	0.052
n°4	4.75	5.175	100	4.938	89.877	0.101
n°3	5.6	9.05	700	34.568	55.309	0.447
½	12.5	15.75	820	40.494	14.815	0.852
¾	19	31.75	300	14.815	0.000	1.000
1 ¾	44.5	47.25	0	0.000	0.000	1.000
2	50	50	0	0.000	0.000	1.000
Total (g)			2025			

(Elaboración propia)

Tabla 35: Análisis granulométrico - Muestra D

Tamiz	Abertura (mm)	Marca de clase	Retenido (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)
< pasa 200	0	0	0	0	100	0
pasa 200	0.038	0.0565	10	0.517	99.483	0.005
n°200	0.075	0.1125	5	0.258	99.225	0.008
n°100	0.15	0.325	5	0.258	98.966	0.010
n°35	0.5	0.84	5	0.258	98.708	0.013
n°16	1.18	2.965	160	8.269	90.439	0.096
n°4	4.75	5.175	170	8.786	81.654	0.183
n°3	5.6	9.05	770	39.793	41.860	0.581
½	12.5	15.75	710	36.693	5.168	0.948
¾	19	31.75	100	5.168	0.000	1.000
1 ¾	44.5	47.25	0	0.000	0.000	1.000
2	50	50	0	0.000	0.000	1.000
Total (g)			1935			

(Elaboración propia)

Con los datos de las Tabla 32, 33, 34 y 35 se obtienen las gráficas de distribución granulométrica para las Muestras A, B, C y D, las cuales se presentan en las Figuras 34, 35, 36 y 37. En estas figuras igualmente se modela la gráfica de distribución granulométrica mediante Weibull.

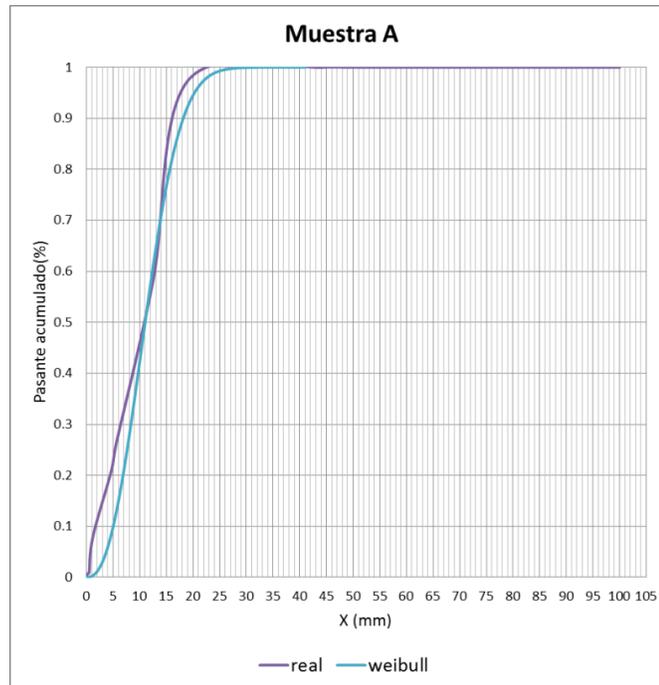


Figura 34: Gráfica de distribución granulométrica Muestra A

(Elaboración propia)

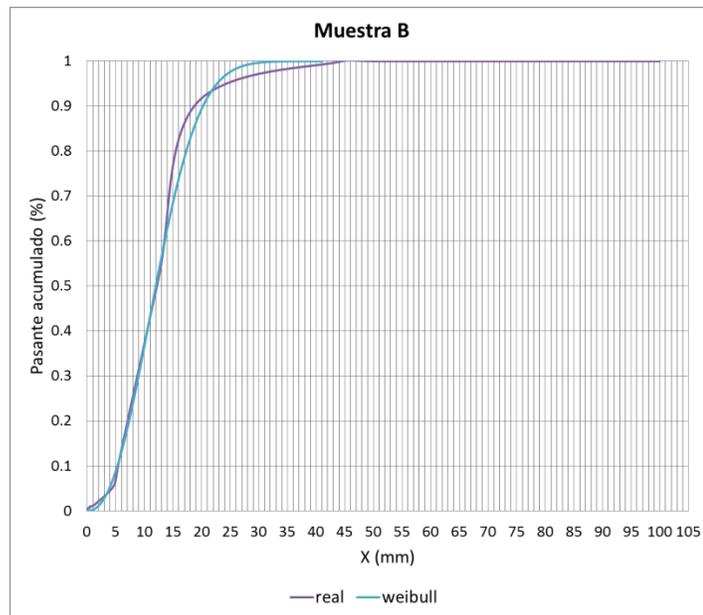


Figura 35: Gráfica de distribución granulométrica Muestra B
(Elaboración propia)

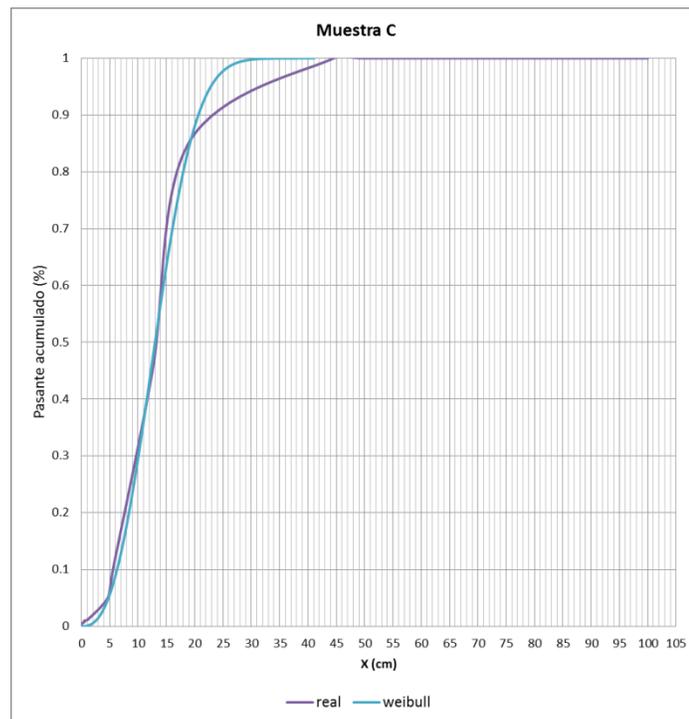


Figura 36 Gráfica de distribución granulométrica Muestra C
(Elaboración propia)

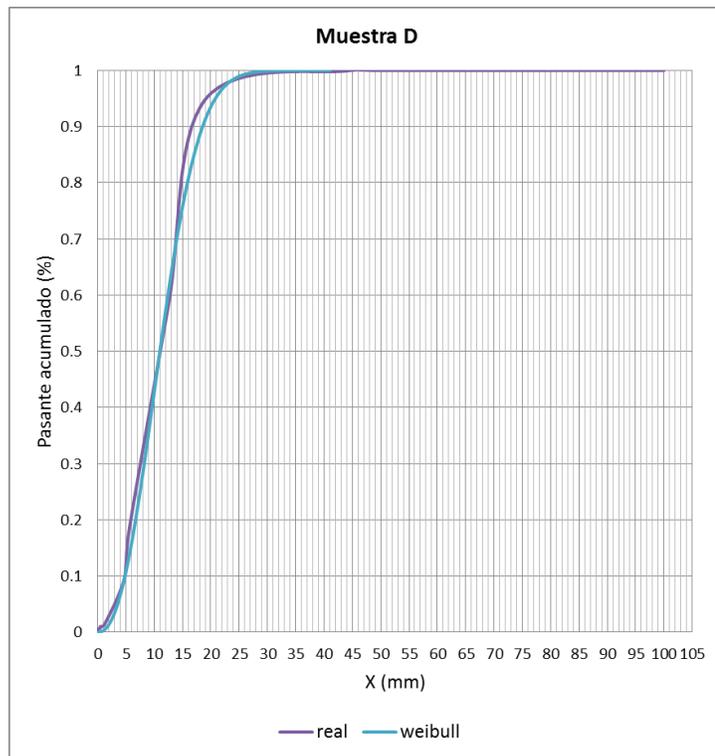


Figura 37: Gráfica de distribución granulométrica Muestra D
(Elaboración propia)

En las figuras de la 34 a la 37, se observó que el rango de valores de las curvas granulométricas se encuentra entre 5 y 25 mm de diámetro para todas las muestras analizadas por medio del tamizado. Además, se observó que la distribución Weibull es capaz de modelar de mejor manera la distribución granulométrica real que la obtenida de forma fotográfica, por esto que se puede considerar que al aproximar las fotografías mediante una distribución de tipo Weibull, se obtendrán resultados más aproximados a la realidad. Además, podemos asumir que al adaptar la distribución granulométrica fotográfica a una distribución Weibull en la parte intermedia de la curva, la fracción fina y la fracción gruesa obtenida mediante el modelo, se acercarán considerablemente a lo real.

3.6.1.4 Comparación final de las muestras

La comparación final de las muestras ordenadas, dispersas y reales se realiza mediante el cálculo del error relativo porcentual del k_{50} y el coeficiente de

uniformidad calculado para las muestras, en contraste con el valor considerado como real o valor de referencia. Dicho valor de referencia se determina mediante el cálculo de la media aritmética para las cuatro muestras en cada percentil. Dichos valores se representan en la Tabla 36, donde se exponen los k50 obtenidos para las muestras A, B, C y D, así como su media aritmética real. De igual manera, en la Tabla 37 se muestran los coeficientes de uniformidad obtenidos para las muestras A, B, C y D, así como su media aritmética real.

Tabla 36: Comparación del tamaño medio de fragmentación “K50”.

Muestra	k50 ordenado	k50 disperso	k50 real	Ordenado	Disperso
A	16,00	17,00	11,00	31,30	35,30
B	16,00	17,00	11,00	31,30	35,30
C	16,00	20,00	13,00	18,80	35,00
D	15,00	15,00	11,00	26,70	26,70
Media	15,74	17,16	11,47	27,20	33,20

(Elaboración propia)

Tabla 37: Comparación del coeficiente de uniformidad “n”

Muestra	n ordenado	n disperso	n real	Ordenado	Disperso
A	1,88	1,49	2,39	27,70	61,10
B	1,30	2,30	2,30	76,80	0,00
C	1,39	1,79	2,29	64,30	27,80
D	1,80	1,44	2,29	27,70	59,70
Media	1,58	1,73	2,32	47,50	34,60

(Elaboración propia)

En la Tabla 36 se observa que con respecto al parámetro k50, el error relativo porcentual tiene un promedio del 30 % indistintamente si la muestra esta ordenada o dispersa. Es su mayoría el k50 obtenido por medio de las fotografías en superior al k50 real. Sin embargo, no se descarta la posibilidad que ocurra el caso contrario al extrapolar dichos resultados a los análisis de las fotografías de voladura.

En cuanto al índice de uniformidad presentado en la Tabla 37, en promedio presenta un error del 35 al 45 %, siendo de igual manera siempre superior el coeficiente de uniformidad real al coeficiente de uniformidad fotográfico.

3.6.2 Verificación del software BlastScheme

En esta sección se presenta el resultado obtenido tras la comparación de la data teórica con la real en cada Cantera de estudio. Los datos teóricos fueron generados por el *software* BlastScheme con la información recopilada en campo, mientras que los datos reales fueron generados por el *software* de análisis fotográfico a partir de las fotos tomadas en campo posteriores a las voladuras.

3.6.2.1 Cantera Clarines

En la Cantera Clarines se realizó la voladura en función de 3 esquemas diferentes, tal como se muestra en la Tabla 16 y dado que fue posible recopilar data fotográfica de las 3 zonas donde fueron aplicados dichos esquemas. En la Tabla 38, Tabla 39 y Tabla 40 se presentan los valores obtenidos para cada caso.

Tabla 38: Comparación de data teórica y real de la Cantera Clarines - Esquema 1

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,97	1,61	66,49
K30	16,00	12,00	26,56
K40	23,00	16,00	29,35
K50	34,45	19,75	42,67
K60	43,00	21,00	50,58
K70	57,00	25,00	55,70
K80	78,00	33,00	57,37

(Elaboración propia)

Tabla 39: Comparación de data teórica y real de la Cantera Clarines - Esquema 2

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,882	1,27	43,99
K30	14,00	21,00	48,21
K40	20,00	22,00	11,25
K50	31,19	25,25	19,05
K60	40,00	32,00	20,63
K70	54,00	36,00	33,80
K80	76,00	49,00	35,86

(Elaboración propia)

Tabla 40: Comparación de data teórica y real de la Cantera Clarines - Esquema 3

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,713	1	40,25
K30	23,00	13,00	44,57
K40	39,00	14,00	63,46
K50	46,25	15,25	67,03
K60	87,00	17,00	80,17
K70	129,00	21,00	83,53
K80	194,00	35,00	81,83

(Elaboración propia)

Dado que para cada esquema el error relativo del k50 varió entre un 19% y un 67%, a continuación, en el Gráfico 16 se presenta para el Esquema 1 con un 42,66% de error, la curva granulométrica teórica y una línea segmentada conformada por los valores reales de los pasantes k30, k40, k50, k60, k70 y k80, la cual representa la distribución granulométrica real.

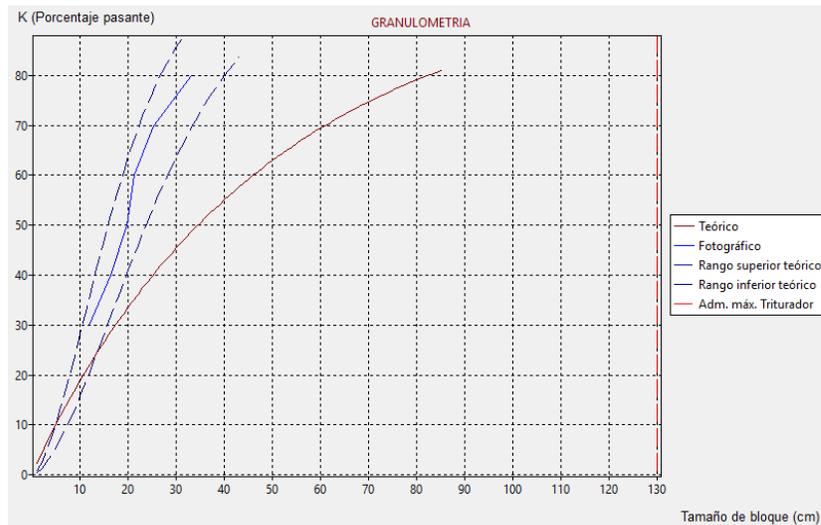


Gráfico 16.- Comparación de data teórica y real de la Cantera Clarines - Esquema 1

(Elaboración propia)

3.6.2.2 Cantera Cantaca

En la Cantera Cantaca se realizó la voladura en función de 3 esquemas diferentes, tal como se expuso a detalle en la Tabla 19. Dado que sólo fue posible recopilar data fotográfica de las zonas de voladura donde fue aplicado el esquema 1, en la Tabla 41

se muestran los valores obtenidos en la comparación de la data real con la histórica, usando sólo el esquema 1.

Tabla 41: Comparación de data teórica y real de la Cantera Cantaca - Esquema 1

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,895	1,15	28,49
K30	20,00	11,00	46,25
K40	30,00	14,00	54,17
K50	35,54	16,25	54,28
K60	57,00	22,00	61,84
K70	78,00	25,00	67,63
K80	108,00	34,00	68,75

(Elaboración propia)

En el Gráfico 17, se muestra referente al esquema 1 con un 54,27 % de error del k50, la curva granulométrica teórica y una línea segmentada conformada por los valores reales de los pasantes k30, k40, k50, k60, k70 y k80, la cual representa la distribución granulométrica real.

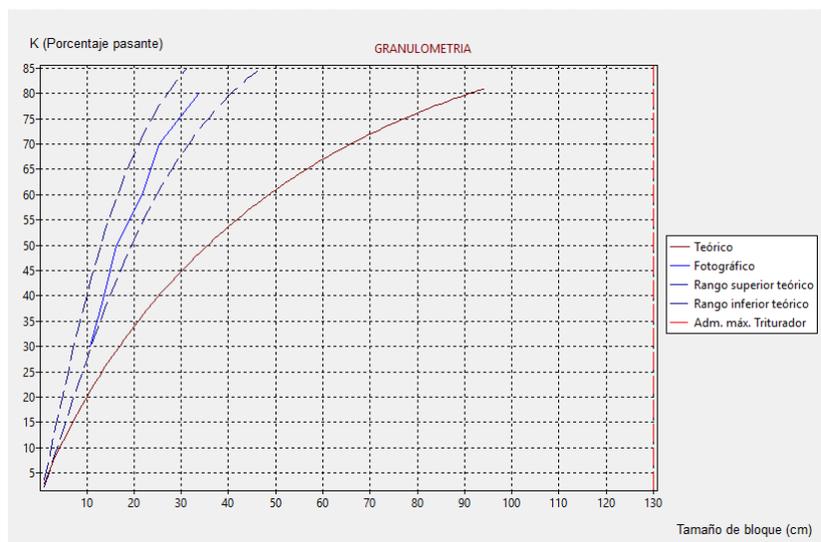


Gráfico 17.- Comparación de data teórica y real de la Cantera Cantaca - Esquema 1

(Elaboración propia)

3.6.2.3 Cantera Bolívar 1

En la Cantera Bolívar 1 se realizó la voladura en función de 4 esquemas diferentes, los cuales están expuestos en la Tabla 17. Dado que sólo fue posible recopilar data

fotográfica de las zonas de voladura donde fueron aplicados los esquemas 1 y 4. En la Tabla 42 y Tabla 43, se presentan los valores obtenidos en la comparación de la data real con la histórica, usando sólo los esquemas 1 y 4.

Tabla 42: Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 1 - Esquema 1

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,817	1,2	46,88
K30	11,00	14,00	25,00
K40	18,00	18,00	1,39
K50	28,88	22,75	21,23
K60	37,00	31,00	16,89
K70	52,00	38,00	27,40
K80	74,00	46,00	38,18

(Elaboración propia)

Tabla 43: Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 1 - Esquema 4

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,79	1,20	50,19
K30	15,00	14,00	8,33
K40	23,00	18,00	20,65
K50	32,52	22,75	30,05
K60	48,00	31,00	35,94
K70	68,00	38,00	44,49
K80	99,00	46,00	53,79

(Elaboración propia)

Dado que para cada esquema el error relativo del k50 varió entre un 21,23% y un 30,05%, a continuación, en el Gráfico 18, se toma el mayor error y se presenta para el esquema 2 con un 30,05% de error del k50, la curva granulométrica teórica y una línea segmentada conformada por los valores reales de los pasantes k30, k40, k50, k60, k70 y k80, la cual representa la distribución granulométrica real.

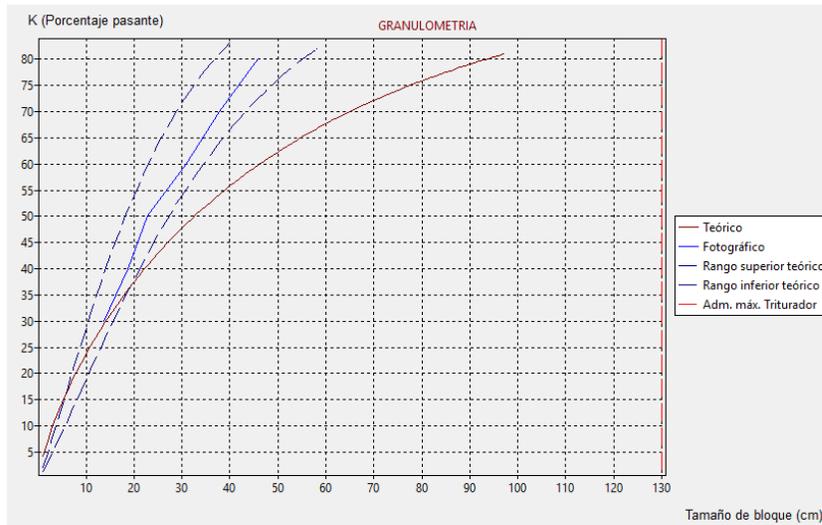


Gráfico 18.- Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 1 - Esquema 2
(Elaboración propia)

3.6.2.4 Cantera Bolívar 2

En la Cantera Bolívar 2 se realizó la voladura en función de 2 esquemas diferentes, tal como se expuso en la Tabla 18, y, dado que fue posible recopilar data fotográfica de las 2 zonas donde fueron aplicados dichos esquemas. Se presentan en la Tabla 44 y Tabla 45 los valores obtenidos para cada caso.

Tabla 44: Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 2 - Esquema 1

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,848	1,53	80,42
K30	12,00	19,00	56,25
K40	18,00	27,00	51,39
K50	28,88	32,75	13,39
K60	36,00	37,00	3,47
K70	50,00	44,00	12,50
K80	71,00	57,00	20,07

(Elaboración propia)

Tabla 45: Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 2 - Esquema 2

	Teórico (cm)	Fotográfico (cm)	Error relativo porcentual (%)
Coefficiente de Uniformidad	0,799	1,5	87,73
K30	15,00	19,00	25,00
K40	23,00	27,00	18,48
K50	32,52	32,75	0,69
K60	48,00	37,00	23,44
K70	68,00	44,00	35,66
K80	99,00	57,00	42,17

(Elaboración propia)

Dado que para cada esquema el error relativo del k50 varió entre un 0,69% y un 13,39%, en el Gráfico 19 se toma el mayor error y se expone para el esquema 1 con un 13,39% de error del k50, la curva granulométrica teórica y una línea segmentada conformada por los valores reales de los pasantes k30, k40, k50, k60, k70 y k80, la cual representa la distribución granulométrica real.

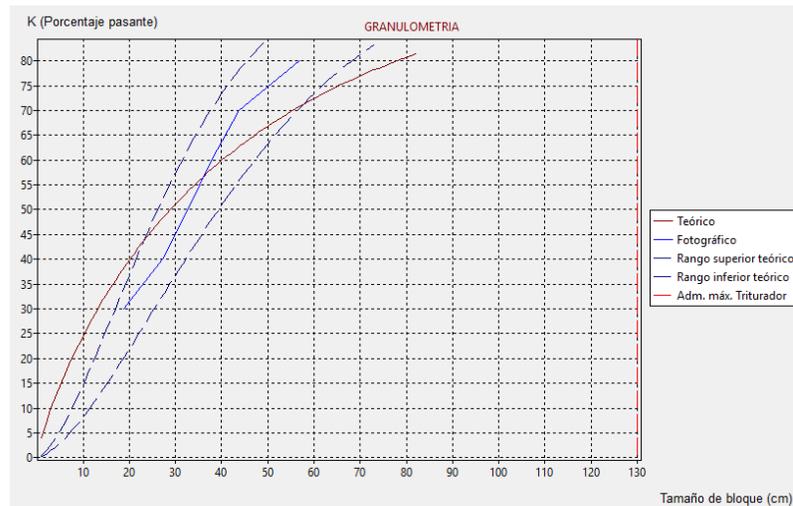


Gráfico 19.- Comparación de data teórica y real de la Cantera Bolívar 2 - Esquema 1

(Elaboración propia)

3.6.3 Análisis de la validación del BlastScheme

Tras obtener los resultados de la comparación de los datos teóricos con los reales en todas las canteras estudiadas, se puede decir, que los datos teóricos presentan un rango más amplio de valores en sus distintos porcentajes de pasante, mientras que los reales varían en menor medida entre un valor pasante y otro, apreciándose en el

incremento del coeficiente de uniformidad de los datos reales con respecto a los teóricos en cada cantera.

Dicho incremento se debe a que el modelo de análisis granulométrico real se rige por el modelo estadístico de distribución de frecuencias que pondera la ocurrencia de los diámetros de los fragmentos dentro de una clase. Esto puede generar que, a mayor cantidad de finos visibles en las fotografías, el parámetro de escala k50 es desplazado hacia los finos. Por el contrario, los resultados teóricos se basan en el modelo de distribución de Weibull que modela la granulometría punto a punto y donde no se cuenta con más de un fragmento por cada porcentaje de pasante.

Debido a lo anteriormente expuesto, en las Tablas 38 a 45, se presentan errores relativos porcentuales elevados en el coeficiente de uniformidad y en los k50. Sin embargo, para conocer la magnitud de este error, se calculó su porcentaje en función del tamaño máximo de admisión del triturador primario, dado que este parámetro es el que dicta si un fragmento es considerado sobretamaño o pasante. En la tabla 46 se muestra el porcentaje de error del k50 en función del tamaño máximo de admisión del triturador.

Tabla 46: Porcentaje de error del k50 en función de la admisión máxima del triturador

	k50 Teórico (cm)	k50 Real (cm)	Admisión máxima del triturador (cm)	Error relativo (%)
Clarines	27.34	19,75	130,00	5.83
Clarines	32.74	25,25	130,00	5.76
Clarines	40.44	21.25	130,00	14.76
Cantaca	35,54	16,25	40,00	48,23
Bolívar 1	28,88	22,75	110,00	5,57
Bolívar 1	32,52	22,75	110,00	8,88
Bolívar 2	28,88	32,75	110,00	3,52
Bolívar 2	32,52	32,75	110,00	0,21

(Elaboración propia)

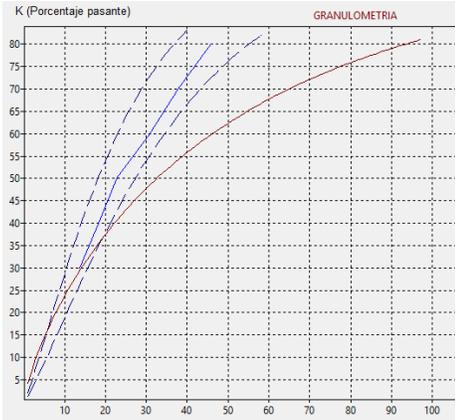
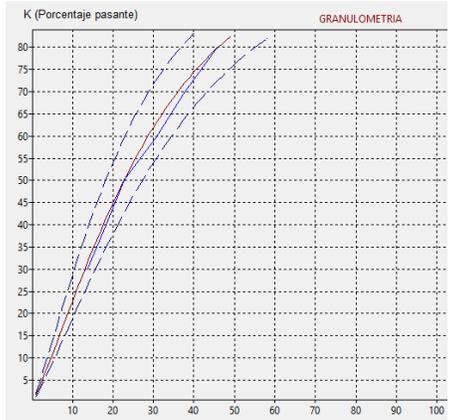
En la tabla anterior se puede observar que, dependiendo de la escala el error tiene un comportamiento diferente, debido a que en la cantera Cantaca, donde la admisión es de 40 cm el BlastScheme presentó un error de 48,23%, mientras que en las otras el error medio fue de 8,27% con un valor máximo de 23,85% y un mínimo de 0,21%.

De lo anteriormente expuesto, puede decirse que el *software* BlastScheme va a presentar una mayor confiabilidad para las canteras que posean un triturador primario con una apertura máxima superior a 1 m, mientras que para trituradores con aperturas inferiores va a ser menos certero.

Dado que el *software* cuenta con un mecanismo de autovalidación, por cada voladura registrada se hará un re-cálculo en su nivel de confiabilidad. Así mismo, como parte del funcionamiento del *software* es obtener un factor de corrección al coeficiente de uniformidad, puede decirse que al corregir ese parámetro de diseño la confiabilidad se incrementará en el tiempo.

En relación a la validez, se puede decir que, la granulometría resultante del análisis fotográfico evidencia un comportamiento cónsono con la distribución generada por el BlastScheme (Tabla 47), donde ajustando los parámetros de la ecuación a los valores reales de coeficiente de uniformidad y k_{50} se consigue una curva que toca casi todos los puntos de la línea recta segmentada, del mismo modo, si se grafica una línea superior e inferior de tolerancia en el rango de la distribución, en función del error encontrado en el *software* de análisis fotográfico utilizado en este estudio, se obtendrá el resultado reflejado en la Tabla 47 - columna 2.

Tabla 47: Comparación de una distribución Weibull proyectada con una ajustada

Fracción del Gráfico 10 con la granulometría proyectada en el momento de la generación del esquema	Fracción del Gráfico 10 con la granulometría ajustada a los valores recibidos de la voladura resultante
	

(Elaboración propia)

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos en la investigación, se generaron un conjunto de conclusiones referidas a los siguientes tópicos:

En relación al análisis de las bases teóricas y elaboración de la Guía de Observación

En cuanto al análisis de las variables:

- El retiro es la variable fundamental para todos los autores estudiados en el diseño de patrones de perforación y voladura en canteras.
- Al modificar las variables de origen, tales como: longitud del barreno, factor de carga, densidad de la roca y resistencia a la compresión simple; ninguna genera una variación superior a en 0,5 m en el retiro, a lo largo de todo el intervalo de análisis. Por el contrario, la variación del diámetro supera en todos los casos al resto de las variables, pudiendo alcanzar valores de hasta 4.5 ms de variación en el retiro.

Referente a los modelos de fragmentación:

- Las variables de mayor peso dentro de los modelos son el factor de carga y el retiro. Estas variables se presentan como parámetros fundamentales en el cálculo del coeficiente de uniformidad “n” y tamaño medio de fragmentación “k50”.
- Los parámetros “n” y “k50” son fundamentales para el cálculo de la distribución granulométrica resultante mediante la función de Weibull.
- Los parámetros fundamentales para el cálculo de “n” y “k50” son la constante de volabilidad de la roca (c) y los antes mencionados, factor de carga y retiro.
- El patrón de perforación, en conjunto con el sistema de cargas con el que se diseñe y las características de la roca, condicionan de forma definitiva la granulometría resultante de la voladura.

En relación al comportamiento del postulado de distribución granulométrica ante la iteración:

- Una disminución del factor de carga implica que existe menos cantidad de explosivo por barreno o que el mallado se amplió, por lo cual se genera un aumento del tamaño en la granulometría
- Un aumento de las constantes de roca (c), implica que la misma requiere un mayor factor de carga para ser fragmentada, por lo cual, si se aumenta dicho parámetro y se deja el sistema de perforación igual, se obtendrá un aumento en todos los diámetros de la fragmentación resultante.
- Al aumentar el retiro se disminuye el factor de carga, lo cual se traduce en la generación de un aumento de los diámetros en la distribución granulométrica.
- En cuanto al aumento de la altura y la relación S/B, sucede lo mismo que el caso anterior, ya que un aumento de estas variables conlleva a una disminución del factor de carga y a su vez a un aumento de los diámetros de la fragmentación.
- Cuando el diámetro aumenta lo hace también el parámetro de uniformidad, lo que indica que a mayores diámetros se tendrá una distribución de tamaños más cercanos al valor central.
- La relación espaciamiento y retiro presenta un comportamiento inverso, a medida que aumentamos esta relación, disminuye el índice de uniformidad, por ende, a mayores relaciones entre el S/B, se tendrá presencia de una distribución de tamaños más alejada de su valor central.

En cuanto al comportamiento de la distribución según el índice de uniformidad:

- A mayores valores de “n”, la distribución de tamaños se encuentra más cercana a su valor central “k50”.
- Los valores de “n” más cercanos a una distribución granulométrica real se encuentran entre 0,5 y 2. Lo cual concordó con Sanchidrián (2013), donde se señala que las distribuciones tamaños más homogéneas y cercanas a las

distribuciones de tamaños resultante de procesos de fragmentación, cuentan con un índice de uniformidad entre 0,8 y 1,7.

- Las afirmaciones de Sanchidrián (2013) coincidieron con la validación del *software ImageJ* en el laboratorio, donde se obtuvieron valores de “n” ente 1,8 y 2,3 para todas las muestras analizadas.

En cuanto a la distribución Weibull:

- El k50 actúa como un punto pivote en la distribución, para lo cual dicho punto fija el valor central de la distribución y actúa como un parámetro de escala.
- La variación del k50 desplaza la curva hasta valores más gruesos o más finos de la distribución.
- El valor de “n” dentro de la distribución actúa como un parámetro que ajusta la pendiente o como uno de forma cómo está descrito en la literatura.
- La distribución se verifica durante el proceso de validación del *ImageJ*, donde la distribución es capaz de modelar de forma satisfactoria los procesos de fragmentación.

En cuanto a la discriminación de variables:

- Se concluye que las constantes son: el RWS, el factor de roca, el factor de verticalidad, la densidad del explosivo, la velocidad de detonación y la presión de detonación.
- Se concluye que las variables fundamentales son las siguientes: altura del banco, diámetro, longitud del barrenos, factor de carga, densidad de la roca, resistencia a la compresión simple y velocidad sísmica de propagación.

En relación a la aplicabilidad del software

La adaptación del *software BlastScheme* opera bajo las siguientes características exclusivas:

- Uso de explosivos en sacos y encartuchados, sin sistemas automáticos para el llenado de los barrenos.

- Uso de sistemas iniciadores por retardos.
- Perforación con diámetros entre 3 y 5 pulgadas.
- Sistema de perforación en tres bolillos.
- Barrenos inferiores a 20 m de profundidad.
- Bajo nivel de información geológica.
- Admisión máxima de primario superior a los 80 cm.
- Taco diseñado según 0,20 veces la profundidad del barreno.
- Carga de fondo comprendida entre cero y 0,40 veces la profundidad del barreno.

En relación a la validación del software BlastScheme

- La ratificación del *ImageJ* aporta validez al *software* BlastScheme, en vista de que se demuestra que la distribución Weibull, vale como un modelo para representar la distribución de tamaños posteriores a la voladura.
- El coeficiente de uniformidad de Cuninghan no genera valores mayores a 1,8 por los procesos de optimización de factor de carga y diámetro del k50, mientras que en campo es posible observar coeficientes superiores a 2, por lo cual se decidió incorporar al diseño del BlastScheme un parámetro de corrección de dicho coeficiente.
- El error del parámetro k50 está entre 0,4 % y 25 %, tomando los datos salidos directamente del *ImageJ* y sin considerar el error propio de dicho *software*.
- Dado que a la adaptación del BlastScheme se le incluyeron funciones que permiten dar a conocer un parámetro de corrección del coeficiente de uniformidad, el *software* será capaz de auto validarse en el tiempo y ajustar su valor de confiabilidad.

Conclusiones generales

Las conclusiones más importantes que se generaron a lo largo de la investigación fueron las siguientes:

- La tendencia actual debe ser ver el proceso de voladura como un diseño que se genera del conocimiento de múltiples casos y análisis de modelos de diferentes tipos.
- El diseño de la operación unitaria de arranque indirecto con perforación y voladura en canteras no puede ser vista de forma homogénea, ya que la misma no sigue un solo patrón de perforación y carga para todo el frente de voladura. Es necesario ver el resultado final como un conjunto de variables controlables del proceso, que interactúan entre sí para ofrecer un único resultado final.
- El *software* representa una herramienta adaptada a la operación unitaria de perforación y voladura en canteras, dado que fue diseñado para trabajar con empresas de minería no metálica enfocadas en la producción de agregados y productos ornamentales.
- Debido al bajo requerimiento de precisión en los decimales del resultado, se concluyó que el método de búsqueda directa restringida logró los objetivos planteados, al permitir de manera sencilla obtener un resultado certero en un tiempo menor a 3 segundos.
- El *software* BlastScheme permitió modelar las variables controlables de la operación de voladura, guardar información generada en campo en forma de un registro digital, controlar la operación de voladura a través de la comparación entre el registro digital y los datos del modelo, así como tener funciones diseñadas para apoyar a la operación en canteras a manera de herramientas técnicas y tecnológicas que fortalezcan las operaciones, la planificación, el modelamiento, la proyección y el control de una cantera.
- El *software* BlastScheme es confiable para la proyección de resultados granulométricos y esta característica está dispuesta para aumentar en el tiempo. Sin embargo, también se concluyó, que el *software* presenta mayor confiabilidad cuando opera en canteras con triturador primario de admisión máxima mayor a un metro.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a los usuarios de las guías de recolección del BlastScheme, utilizar las variables recopiladas para la toma de decisiones, e incorporarlas como indicadores en una planificación a corto plazo de la operación unitaria de arranque indirecto.

Se recomienda aplicar el uso del BlastScheme en al menos en una cantera por cada tipo de yacimiento de las rocas con las que opera el *software*, para lograr la validez en el tiempo con cada una de ellas.

Se sugiere eliminar la dependencia del BlastScheme con el *software ImageJ* o cualquier otro *software* de análisis fotográfico, mediante reconocimiento de patrones por redes neuronales y uso de algoritmo genético.

Se recomienda incorporar herramientas adicionales sobre sistemas de retardos y modelos de vibraciones.

Se sugiere incluir en un futuro modelos tridimensionales de secuencias de detonación y fragmentación.

Se recomienda extender el uso del BlastScheme a otras áreas de la minería, como minería a gran escala y subterránea.

Se recomienda migrar el funcionamiento del BlastScheme a una aplicación compatible con Android, para difundir su uso y aumentar la data de históricos mediante los registros de la nube.

Se sugiere incluir una función para adaptar la recolección de data de modo que sea compatible con datos tomados por drones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (1994). Aplicación de un modelo de fragmentación de rocas en la reducción de los costos de voladura en minería. En T. I. Metallurgy, *Mining Latin America* (págs. 313-322). Madrid - España: Springer-Science+Business Media, B. V.
- Anjoul, V., & Utches, C. (2015). *Un software libre para modelar patrones de voladura en minería a cielo abierto*. Informe de la asignatura Investigación Aplicada. Universidad Central de Venezuela, Minas, Caracas- Venezuela. Inédito.
- Arnaudez, R. (2015). *Optimización de los patrones de voladura en función de las características del explosivo y de la roca perteneciente a la mina Paso Diablo, edo. Zulia*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Minas, Caracas - Venezuela. Inédito.
- Artigas, M. (2012). *Diseño de patrones de perforación y voladura, para normalizar la fragmentación del material resultante de la mina choco 10 empresa PMG S. A. El Callao, edo. Bolívar*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Minas, Caracas - Venezuela. Inédito.
- Castillo, S., Bladimir, J. (2002). *Análisis y evaluación técnica de la implantación del software Drill & Blast de Mincom a las operaciones de perforación y voladura de la mina Paso Diablo, Municipio Páez, edo. Zulia*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Minas, Caracas - Venezuela. Inédito.
- Contreras, E., Pedraza, E., & Rojas, C. (2010). *Análisis granulométrico post-tronadura*. Universidad de Chile, Ingeniería de Minas, Chile.
- Delphi Basics*. (s.f.). Obtenido de <http://www.delphibasics.co.uk/>
- Díaz, J., & Guarín, M. (2012). *Análisis y diseño de la operación de perforación y voladuras en minería de superficie empleando el enfoque de la programación estructurada*. Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Escobar, A., Gallego, R., & Romero, R. (2014). *Programación no lineal*. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira - Colombia.

Exsa. (2002). *Manual practico de voladura* (4 ed.). Lima, Peru: Exsa.

Facultad de Ingeniería USAC. (2011). *Manual de estadística descriptiva*. Guatemala.

Fiscalab. (s.f.). Obtenido de <https://www.fiscalab.com/apartado/errores-absoluto-relativos#contenidos>

Gamero, A., Hurtado, R., & De Abrisqueta, A. (Diciembre de 2014). Caracterización geoquímica de minerales pesados recolectados en la zona nor-occidental del Estado Bolívar. (F. d. UCV, Ed.) *Rev. Fac. Ing. UCV vol.29 no.4 Caracas dic. 2014*, 29(4). Obtenido de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652014000400004

González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica*. México DF: Prentice-Hall.

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Investigación de Operaciones*. México DF: Mc Graw Hill.

Hurtado, J. (2015). *El Proyecto de Investigación*. Colombia: Quirón.

ImageJ. (s.f.). Obtenido de <https://imagej.nih.gov/ij/>

INKSCAPE. (s.f.). Obtenido de <https://inkscape.org/en/>

Jimero, L., Jimero, E., Pereira, J., & Ortiz, F. (2012). *Manual de perforación y voladura en rocas*. Madrid, España: Etimsa.

Konya, C., & Albarrán, E. (1998). *Diseño de Voladuras*. México: Cuicatl.

Langefors. (1976). *Técnica moderna de voladura de rocas*. Bilbao - España: Urmo.

Lazarus. (s.f.). Obtenido de <http://www.lazarus-ide.org/>

Mensah, D. (2012). *Un software para el diseño de voladuras en minería a cielo abierto*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid - España.

Naghi, M. (1985). *Investigación de Operaciones*. México: Limusa.

Orica. (2014). *Orica Venezuela*. Obtenido de <http://www.orica.com/Contact-Us/Global-Offices/Venezuela#.WALxv-jhDcs>

Orica Mining Service. (2012). *Catalogo de productos Orica*. Recuperado el 26 de marzo de 2016, de <http://www.eyenesa.com/site/images/stories/ORICA%20CATALOGO%202012.pdf>

- P., S. (2004). *Análisis experimental de la fragmentación, vibraciones y movimiento de la roca en voladuras a cielo abierto*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid - España.
- PDVSA. (s.f.). *Código Geológico de Venezuela*. Obtenido de Código Extratigráfico de las Cuentas Petroleras de Venezuela: <http://www.pdv.com/lexico/>
- Pierdant, A., & Rodríguez, J. (2006). *Elementos básicos de estadística para Ciencias Sociales*. Universidad Autónoma Metropolitana , Unidad Xochimilco, México DF.
- Quiroga, M. (2013). *Análisis de la perforación y tronadura en El Soldado*. Universidad de Chile, Minas, Chile.
- Sanchidrián, J. (2013). *¿Qué función representa mejor la distribución granulométrica de la roca fragmentada?* Artículo, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Minas y Energía, Madrid - España.
- Taha, H. (2012). *Investigación de Operaciones*. México: Pearson.
- Ucar, N. (1976). *Importancia del retiro en el diseño de voladuras y parámetros a considerar*. Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas - Venezuela.
- Utches, C. (2014). *VARIABLES NO CONTROLABLES QUE INTERVIENEN EN LA PLANIFICACIÓN, EJECUCIÓN Y RESULTADO DE UNA VOLADURA*. Pasantía industrial. Universidad Central de Venezuela, Minas, Caracas - Venezuela. Inédito.
- Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Monterrey - México: Limusa.

ANEXOS

Anexo 1: Interfaz del Software de diseño de voladura BlastScheme versión 1.0

BlastScheme es un *software* de código libre para el diseño de voladura a cielo abierto y modelado de la distribución granulométrica. El mismo fue creado en el año 2015 en la Universidad Central de Venezuela por los investigadores Anjoul y Utches, como parte de un proyecto de la asignatura Investigación Aplicada código (3238) dictada en el Departamento de Minas. Este *software* fue presentado por primera vez en el 4to Congreso de Ciencia y Tecnología en Venezuela, realizado en noviembre del año 2015.

La interfaz del *software* consiste en un sistema de cuatro pestañas que permiten ir avanzando en cada una de ellas hasta lograr el completo diseño de la voladura. Al iniciar el programa por primera vez, este comienza una primera fase de carga que dura un total de 5 segundos (Figura 1).



Figura 1: Inicio del programa

(Elaboración propia)

Una vez culminada la fase de carga, el programa pasa a la pestaña de topografía (Figura 2). Esta primera pestaña permite introducir las variables globales del programa, tales como: el diámetro e inclinación del barreno, densidad de la roca, densidad del explosivo, altura del banco, ancho del frente de trabajo, resistencia de la roca y por último, parámetros referentes a la calidad de la roca. Al iniciar el ingreso de las variables, el programa activará sus funciones. En los recuadros vacíos se mostrará un rectángulo en color rojo, luego de introducir las variables de la forma

correcta, se mostrará un rectángulo en color verde y se habilitarán los autores con los cuales se quiere realizar el cálculo de retiro (Langefors, Konya y Ucar), los cuales podrán ser seleccionados con un *check*. Posteriormente se procede a oprimir el botón calcular y se obtendrá el retiro según los autores seleccionados y automáticamente se promediará los valores obtenidos, con la finalidad de hallar un valor central.

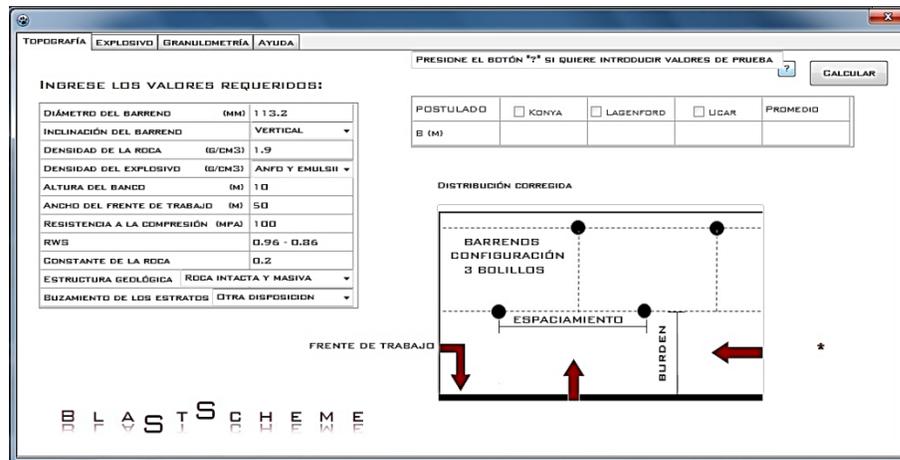


Figura 2: Pestaña principal

(Elaboración propia)

Una de las funciones que más destaca en esta sección es el diagrama esquemático de un patrón de voladura en tresbolillo, donde se visualiza la cara libre del frente, el espaciamiento y el retiro. De esta forma es posible ubicar rápidamente a que parámetros se hace referencia en el cálculo superior, así los usuarios con menos experiencia en estas labores pueden comprender sus resultados sin mayor problema.

En la segunda pestaña referente a los explosivos (Figura 3), se muestra en la parte izquierda de la figura una lista con los valores de: volumen a volar, cantidad de barrenos requeridos para el área de trabajo, cantidad de barrenos por fila, cantidad de filas, el retiro corregido, el espaciamiento, el taco, la sobre perforación y el factor de carga.

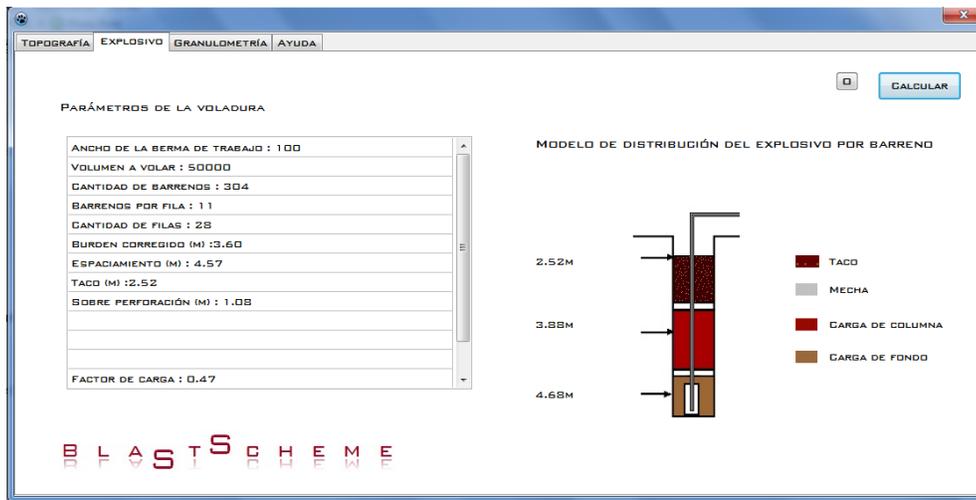


Figura 3: Pestaña de explosivos

(Elaboración propia)

En la Figura 3, correspondiente a la pestaña de explosivos, se visualiza igualmente un diagrama esquemático de un barreno típico, donde se señalan con una flecha el valor de la altura de carga de fondo, la altura de carga de columna y la altura del taco, así como, una leyenda en colores para las partes del gráfico, de manera que tenga una lectura rápida. Este gráfico es dinámico y tiene la capacidad de cambiar en función de la configuración del barreno. En los casos cuando el barreno no tiene carga de fondo y trabajamos con un sólo explosivo, el diagrama se presenta como en la Figura 4.

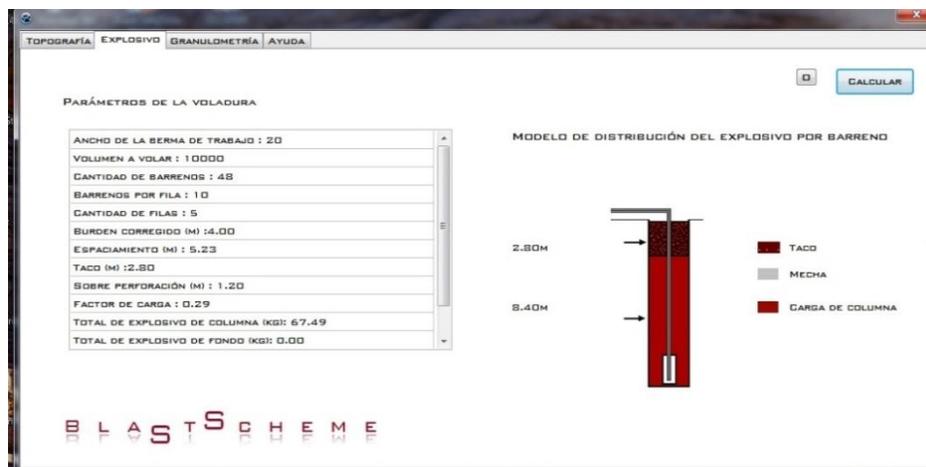


Figura 4: Variante de la pestaña de explosivos

(Elaboración propia)

En la Figura 5 se muestra la pestaña de granulometría, la cual contiene el factor de carga utilizado en los cálculos, el retiro corregido, los valores de tamaño máximo del bloque y el resultado analítico de distribución granulométrica media (k50) calculado por la ecuación de Larson.

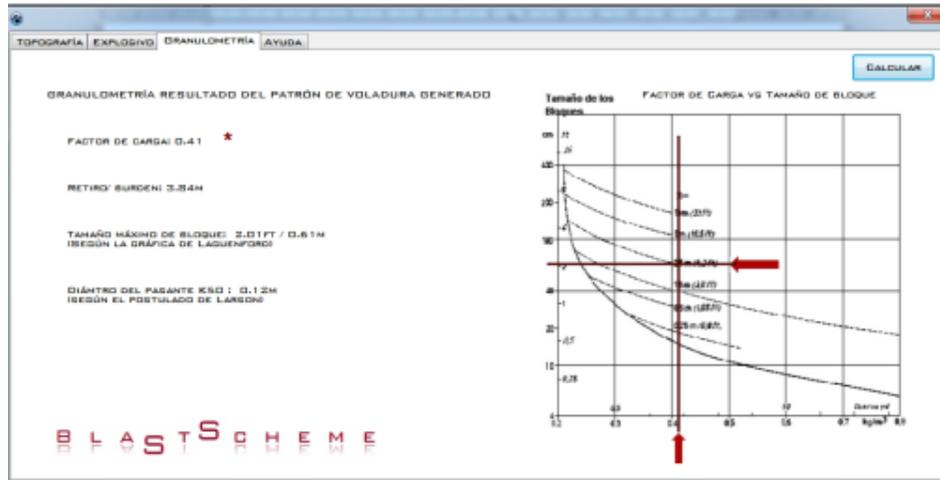


Figura 5: Pestaña de granulometría

(Elaboración propia)

Finalmente, en la Figura 6 se presenta la pestaña de ayuda, una sección dedicada enteramente para la ayuda. Esta sección contiene información acerca de las variables globales que maneja el programa, posibles dudas, métodos de cálculo y aclaratorias del funcionamiento del mismo.

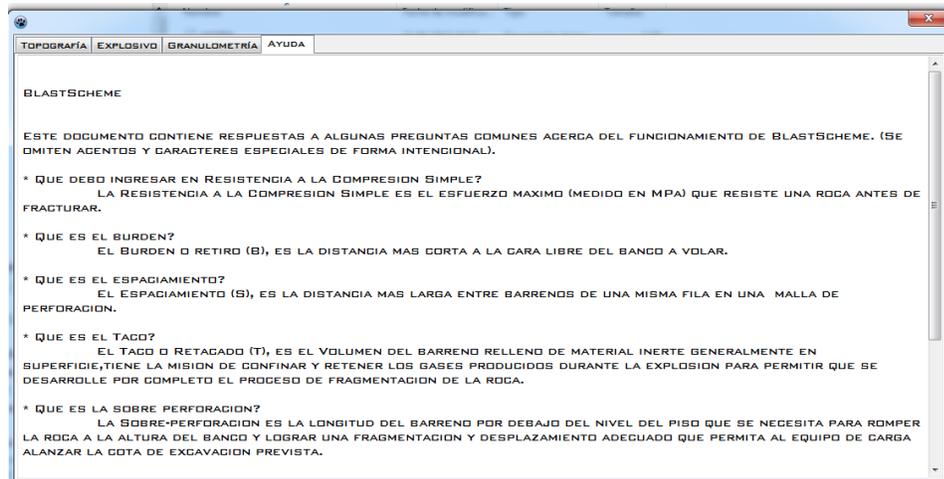


Figura 6: Pestaña de ayuda

(Elaboración propia)

Anexo 2: Instrumento de validación de la Guía de Observación



República Bolivariana de Venezuela
Universidad Central de Venezuela
Facultad de Ingeniería
Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Estimado Evaluador:

El instrumento que se le presenta a continuación, tiene la finalidad de contar con su criterio como validador en calidad de Juicio de Experto, de una investigación que lleva por título: Adaptación del *software* BlastScheme para la operación unitaria de perforación y voladura en canteras.

El instrumento a validar por usted, es una guía de observación, el cual servirá para recolectar las variables controlables y no controlables que intervienen en el diseño de voladura en canteras.

La evaluación requiere de la lectura exhaustiva de cada uno de los ítems propuestos a los fines de cotejarlos de manera cualitativa con los criterios propuestos relativos a: coherencia con los objetivos de investigación, congruencia de los ítems con el contenido, correspondencia de los ítems con la variable que busca recolectar, así como, la claridad de la redacción de instrucciones e ítems.

Se le invita y agradece que sea juez y crítico de cada ítem de acuerdo con los criterios propuestos, así como, las observaciones o sugerencias que usted considere pertinente.

Sin otro particular al que hacer referencia y agradeciendo de antemano la atención prestada.

**VALIDACIÓN
JUICIO DE EXPERTO**

Instrucciones para los validadores:

El evaluador deberá considerar si el ítem presenta o no los criterios propuestos, y en caso necesario ofrecer un espacio para las observaciones o sugerencias a la que hubiere lugar.

Guía de observación día de voladura (tabla 14)

Ítems	coherencia		Congruencia		correspondencia		Claridad		Sugerencias
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									

Guía de observación para el control de voladuras (tabla 15)

Ítems	coherencia		Congruencia		correspondencia		Claridad		Sugerencias
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									

Señale los aspectos que deben incluirse o eliminarse en los ítems anteriores:
