

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

**ANÁLISIS DE LA PERFORACIÓN Y TRONADURA EN EL SOLDADO**

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

**MARCO AURELIO QUIROGA ACUÑA**

**PROFESOR GUÍA:  
JAIME CHACÓN FERNÁNDEZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
ALDO CASALI BACELLI  
CARLOS ORLANDI JORQUERA**

**SANTIAGO DE CHILE  
2013**

*La teoría es asesinada tarde o  
temprano por la experiencia*

***Albert Einstein***

## RESUMEN

La tronadura es un proceso clave dentro de cualquier faena minera, por lo cual se hace necesario su entendimiento global para minimizar los costos de las operaciones posteriores: carguío, transporte, chancado y molienda.

Actualmente la faena minera El Soldado de Anglo American está probando alternativas de diseño en perforación y tronadura, lo que dio origen a este estudio, cuya finalidad es cuantificar los resultados del proceso, para luego obtener las variables que entreguen el mayor beneficio global mina-planta.

En el presente informe se cuantificó el resultado de un conjunto de tronaduras mediante la medición granulométrica y su incidencia en los procesos aguas abajo. Específicamente se cuantificó la variación del rendimiento efectivo de las palas y la variación de las toneladas por hora del molino SAG. Usando el software *Split* se logró medir la granulometría en todos los rangos de tamaños. El rendimiento de las palas y las toneladas por hora del SAG se obtuvieron de la base de datos y del *dispatch* de la mina.

Mediante el estudio de los resultados de la tronadura en conjunto con un análisis estadístico, se obtuvieron las variables relevantes del proceso, que son: la litología, la zona, el taco, pero la más importante es el factor de carga.

Se obtuvieron modelos granulométricos y de rendimiento de las palas, en base a las variables relevantes, principalmente en torno al factor de carga. Mediante dichos modelos y teniendo la información de los requerimientos óptimos de carguío y de la alimentación al molino SAG, se calcularon las variables de diseño de perforación y tronadura que maximizan el beneficio neto mina-planta.

Finalmente, se realizó un análisis económico, comparando el actual escenario de operación con el escenario propuesto. La recomendación principal es usar un explosivo más denso y distintas configuraciones de mallas, dependiendo de la fase y del sector a perforar. Otra recomendación complementaria es el cumplimiento del diseño propuesto en terreno; vale decir, asegurar el factor de carga por pozo y por disparo.

## ABSTRACT

Blasting is a key process within any mining operation, so its understanding is necessary to minimize the costs of subsequent operations: loading, haulage, crushing and grinding.

At the moment, Anglo American's the El Soldado mining operation is testing design alternatives for drilling and blasting, which is the base for this thesis. The main purpose of this work is to quantify the results of process changes, so that the variables that give the greatest global benefit for the mine-plant complex can be established.

In this report the results of a set of blasting were quantified by particle size distribution measurements and their incidence in the processes downstream. Specifically the variation of effective performance in the shovels and the tons per hour variation of the SAG mill were quantified. Using *Split* software, the size distribution was measured in all the size ranges. The performance of the shovels and the SAG tons per hour were obtained from the database and mine's *dispatch*.

By studying the blasting results together with data statistical analysis, the relevant variables of the process were determined. These are: lithology, the mine zone, the stemming, but most importantly, the load factor.

Models of size distribution and shovels performance, based on relevant variables, mainly the load factor, were obtained. Using these models and the available information regarding the optimal loading and SAG mill feed requirements, the drilling and blasting design variables which maximize the net benefit of the mine-plant complex were calculated.

Finally, an economic analysis was performed, comparing the present operation scenario with the proposed scenario. The main recommendation is using more dense explosives and different blasting patterns, depending on the phase and the sector to drill. Another complementing recommendation is the implementation on the field of the proposed design; securing the load factor in each well and in each blast.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi profesor guía don Jaime Chacón, a mi profesor co-guía don Aldo Casali y a don Carlos Orlandi, profesor de la comisión, por el irrestricto apoyo y paciencia para con esta memoria; quienes en conjunto pavimentaron con su conocimiento y trayectoria la base teórica en la cual se sustenta mi trabajo.

A la faena minera El Soldado de Anglo American, que me acogió muy bien y donde aprendí bastante. Al superintendente de Perforación y Tronadura quien fuera el responsable directo del tema de la memoria y en general a todo el departamento. A Gonzalo Díaz y Andrés Córdova que confiaron en mí. El apoyo que recibí de Williams Fernández y Miguel San Martín fue vital, ya que me permitió la recolección de los datos. A Nelson Iglesias por sus certeros consejos y su gran capacidad como ingeniero de procesos de la planta. A mis vecinos de campamento, dos excelentes personas: Juan Núñez y Carlos Pérez.

A la Universidad de Chile y a todos mis profesores por haberme entregado las herramientas necesarias para mi desenvolvimiento laboral y humano. El paso por esta institución no fue fácil, pero no lo recorrí solo, ya que mis compañeros siempre estuvieron presentes, lo cual marcará un grato recuerdo.

Finalmente agradezco a mi madre por el constante apoyo moral y su preocupación, y en general a toda mi familia y a toda la gente que compartió conmigo durante este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Motivación .....	2
1.2 Objetivos generales.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcances.....	2
<b>CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES</b> .....	3
2.1 Antecedentes generales.....	3
2.2 Antecedentes geológicos .....	5
2.3 Antecedentes mina-planta.....	7
2.3.1 Perforación y tronadura en El Soldado .....	8
2.3.2 Carguío y transporte.....	15
2.3.3 Procesamiento de minerales.....	15
2.4 Antecedentes bibliográficos.....	21
2.4.1 Aumento de tonelaje de la molienda SAG mediante modificaciones en la operación minera en El Soldado [1] .....	21
2.4.2 Estudio de las variables mina-planta y su incidencia en el tratamiento horario en molinos SAG, mina Los Bronces [2].....	21
2.4.3 Análisis granulométrico Fase 2 en mina El Soldado Anglo American Chile [3] .....	22
2.4.4 Simulación y validación de tronaduras mediante análisis granulométrico en proceso “mine to mil”, mina El Soldado [4].....	23
2.4.5 Análisis geotécnico para la estimación de la fragmentación en tronaduras en minas a rajo abierto, mina Chuquicamata [5] .....	23
2.4.6 Predicción granulométrica en tronadura y su incidencia en el proceso productivo, mina El Soldado [6].....	24
<b>CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO</b> .....	25
3.1 Termoquímica de los explosivos .....	25
3.2 Mecanismos de fragmentación de la roca mediante el uso de explosivos.....	26

<b>CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL ESTUDIO</b> .....	32
4.1 Recopilación de antecedentes .....	33
4.2 Medición de resultados de la perforación y tronadura .....	36
4.2.1 Granulometría del producto de la tronadura .....	37
4.2.2 Protocolo para la toma y análisis de fotografías.....	42
4.3 Análisis de resultados de la tronadura .....	45
4.3.1 Análisis de resultados del producto de la tronadura .....	45
4.3.2 Análisis de resultados en el rendimiento de las palas .....	55
4.3.3 Análisis de resultados en el rendimiento de la planta .....	61
4.4 Análisis de variables .....	65
4.4.1 Variables representativas.....	65
4.4.2 Variable dominante.....	66
<b>CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ECONÓMICO</b> .....	75
5.1 Análisis económico de la mina .....	76
5.2 Análisis económico de la planta .....	80
5.3 Parámetros óptimos de diseño .....	83
5.4 Influencia del diseño propuesto.....	84
<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	86
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	88
<b>ANEXOS</b> .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Diagrama procesos en la mina El Soldado</i> .....	1
<i>Figura 2: Plano de ubicación de la faena El Soldado</i> .....	3
<i>Figura 3: Ubicación de las fases dentro del rajo</i> .....	4
<i>Figura 4: Flowsheet proceso mina-planta</i> .....	4
<i>Figura 5: Plano del sistema de cavidades de la mina</i> .....	5
<i>Figura 6: Distribución geológica espacial del yacimiento El Soldado</i> .....	6
<i>Figura 7: Litologías dominantes de la mina</i> .....	7
<i>Figura 8: Esquema productivo de la mina</i> .....	8
<i>Figura 9: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para la zona de roca sana</i> .....	10
<i>Figura 10: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para la zona de roca sana</i> .....	10
<i>Figura 11: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para la zona de borde</i> .....	11
<i>Figura 12: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para zona de borde</i> .....	11
<i>Figura 13: Zona de caving Fase 2</i> .....	12
<i>Figura 14: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para zona de caving</i> .....	13
<i>Figura 15: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para zona de caving</i> .....	13
<i>Figura 16: Estructura del Anfo pesado</i> .....	14
<i>Figura 17: Pala Komatsu frontal PC-8000</i> .....	15
<i>Figura 18: Diagrama chancado primario sulfuro</i> .....	16
<i>Figura 19: Diagrama molienda convencional</i> .....	16
<i>Figura 20: Diagrama molienda SAG</i> .....	17
<i>Figura 21: Diagrama flotación sulfuros</i> .....	17
<i>Figura 22: Diagrama flotación arenas</i> .....	18
<i>Figura 23: Diagrama chancado primario óxido</i> .....	19
<i>Figura 24: Diagrama chancado secundario óxido</i> .....	19
<i>Figura 25: Diagrama planta extracción por solventes</i> .....	20
<i>Figura 26: Diagrama planta electro obtención</i> .....	20
<i>Figura 27: Proceso de deflagración – detonación</i> .....	27
<i>Figura 28: Vista isométrica de los parámetros de entrada en la perforación</i> .....	29
<i>Figura 29: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase I</i> .....	30
<i>Figura 30: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase II</i> .....	30
<i>Figura 31: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase III</i> .....	31
<i>Figura 32: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase IV</i> .....	31
<i>Figura 33: Diagrama del desarrollo del estudio</i> .....	32
<i>Figura 34: Variables del disparo 950-312</i> .....	34
<i>Figura 35: Malla y explosivo en el disparo 950-312</i> .....	35
<i>Figura 36: Secuencia de salida en el disparo 950-312</i> .....	35
<i>Figura 37: Diagrama de la medición de resultados en perforación y tronadura</i> .....	36
<i>Figura 38: Geometrías de la pila tronada</i> .....	37
<i>Figura 39: Etapas para el análisis mediante Split</i> .....	38

<i>Figura 40: Secuencia en la toma de fotografías disparo 950-312.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 41: Distribución de fotografías por banco.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 42: Curva granulométrica entregada por Split .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 43: Ángulo correcto para tomar las fotografías .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 44: Comparación de fotografías con diferente luminosidad.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 45: Fotografía con acercamiento medio .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 46: Comparación de la continuidad de trazos en Split.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 47: Configuración de la malla, disparo 1265-712 .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 48: Diagrama del análisis por escala .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 49: Distribución del D80 por fotografía en fase 2 .....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 50: Histograma global D80 .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 51: Gráfico D80 por fase .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 52: Gráfico D80 por banco .....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 53: Gráfico D80 por sector .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 54: Zonas de Fase 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 55: Gráfico D80 por zona .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 56: Gráfico D80 por tipo de explosivo .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 57: Gráfico D80 por litología .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 58: Gráfico 3D, malla-explosivo vs D80.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 59: Comparación del rendimiento operacional por fase.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 60: Comparación del rendimiento efectivo por fase .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 61: Rendimiento Pala 2 .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 62: Rendimiento Pala 3 .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 63: Rendimiento Pala 5 .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 64: Rendimiento Pala 6 .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 65: Rendimiento Pala 7 .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 66: Modelos predictivos del rendimiento de las palas en base a la granulometría Fase 2....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 67: Modelos predictivos del rendimiento de las palas en base a la granulometría Fase 3....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 68: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 965 .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 69: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 950 .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 70: Comparación Curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 935 .....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 71: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 920 .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 72: Efecto del chancador en la reducción de tamaños .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 73: Curva promedio estimada .....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 74: Correlación entre la velocidad de perforación promedio y la litología .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 75: Factor de carga en el banco 1265 .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 76: Factor de carga en el banco 965 .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 77: Factor de carga en el banco 950 .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 78: Factor de carga en el banco 935 .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 79: Factor de carga en el banco 935 .....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 80: Factor de carga en el banco 920 .....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 81: Modelo D80 en función del factor de carga en roca sana .....</i>	<i>72</i>

<i>Figura 82: Modelo D80 en función del factor de carga en caving .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 83: Modelo rendimiento efectivo de las palas en función del factor de carga .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 84: Curva promedio de la mina dependiente del factor de carga.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 85: Diagrama del análisis económico global.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 86: Comparación curvas de entrada al SAG con la curva ideal al SAG, roca sana.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 87: Comparación curvas de entrada al SAG con la curva ideal al SAG, caving .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 88: Porcentaje de pozos que cumplen con el factor de carga propuesto .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 89: Simulación del daño producido por tipo de explosivo utilizado .....</i>	<i>85</i>

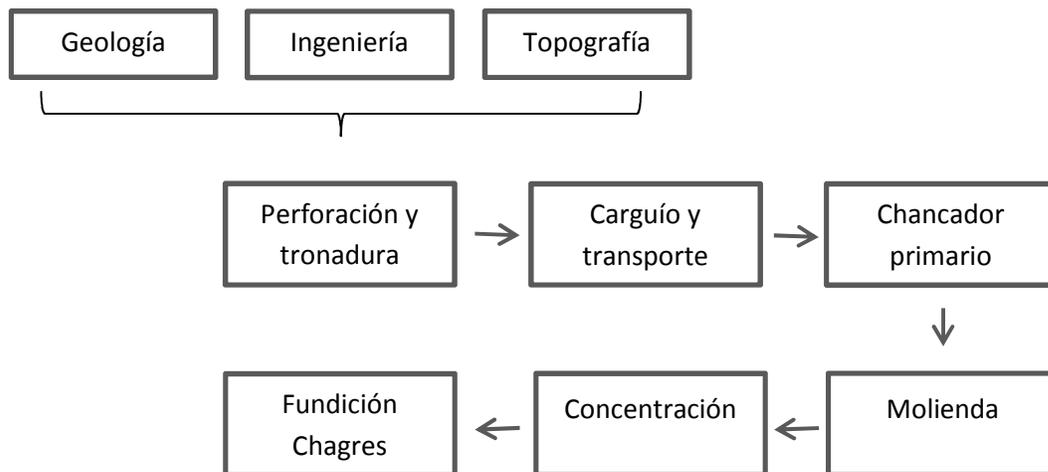
## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Explosivos utilizados en la mina El Soldado.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 2: Litologías y mallas por disparo.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3: Número de fotografías por disparo.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 4: Estadísticas básicas D80.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 5: D80 en estéril y mineral para cada disparo.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6: Rendimiento efectivo de las palas Fase 2 - Fase 3.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 7: Influencia de cada variable en el resultado granulométrico.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8: Influencia del factor de carga en el D80.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9: Factor de carga promedio por disparo.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 10: Porcentaje de pozos con sobrecarga y cantidad de explosivo.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabla 11: Análisis económico en la mina Fase 2 roca sana.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 12: Análisis económico en la mina Fase 2 caving.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 13: Análisis económico en la mina Fase 3.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 14: Análisis económico en la planta.....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 15: Configuración óptima malla-explosivo.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 16: Factor de carga óptimo.....</i>	<i>83</i>

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La minería en Chile es el pilar fundamental de la economía y lo seguirá siendo probablemente por un largo periodo, mientras el precio del cobre y las condiciones generales se mantengan en niveles favorables para la industria. No obstante, hay que tener en consideración los vaivenes de la economía internacional que influyen directamente en la demanda de este metal, lo que en conjunto con la variabilidad operacional del proceso mina-planta sitúan a este sector dentro de los más riesgosos. Así, cada decisión tomada en el proceso global minero tiene un valor crítico, por lo que el entendimiento de cada etapa secuencial, desde la exploración hasta la obtención del producto final, es de vital relevancia. Todo lo anterior se debe enmarcar en la filosofía de mejoramiento continuo para obtener el beneficio global óptimo del proceso completo.

En el diagrama siguiente se puede apreciar el ciclo completo y las relaciones entre los procesos unitarios de la faena El Soldado. El producto final es el concentrado que se envía a la fundición Chagres.



*Figura 1: Diagrama procesos en la mina El Soldado*

Las estrategias de diseño y extracción son planificadas en las áreas de geología e ingeniería, donde se establece un programa de producción a corto, mediano y largo plazo, como también una exigencia de calidad. Luego, en el proceso de perforación y tronadura, se evalúan los parámetros operacionales para obtener la energía necesaria que fragmente la roca. Este producto alimenta al chancador primario que reduce aún más el rango de tamaños. Luego del paso por este chancador, el mineral se transporta por medio de correas a un Stock Pile que alimenta a la molienda

convencional en menor proporción y a la molienda SAG en su mayoría. Luego de finalizados los procesos de conminución se procede a la flotación del mineral, obteniéndose un concentrado que es enviado a la planta de fundición Chagres.

## **1.1 Motivación**

El aumento del rendimiento en carguío y transporte y en la molienda SAG, trae consigo beneficios netos globales en la mina El Soldado. Por ejemplo, el aumento en 1 tph en el rendimiento del molino SAG, considerando los actuales costos de operación asociados al proceso completo del producto, tiene como consecuencia un beneficio marginal de más de 300.000 [US\$] al año.

El último estudio detallado de un proceso “mine to mill”, centrado en la perforación y tronadura en la faena, data del 2008, es por ello que nace la necesidad de actualizar la evaluación de esta etapa crucial para el desenvolvimiento operacional de la mina. Con el uso de modelos adecuados y con una buena caracterización del producto granulométrico, es posible realizar una buena estimación de los efectos de la perforación y tronadura en los procesos posteriores.

## **1.2 Objetivos generales**

Los objetivos generales del proyecto son:

- Revisar y analizar el proceso de reducción de tamaño mina-planta.
- Proponer posibles ajustes de los diseños, conducentes a mejorar los resultados granulométricos.

## **1.3 Objetivos específicos**

- Analizar y validar las distintas mallas de perforación utilizadas en la mina.
- Entender y cuantificar las principales variables que afectan a los resultados de la tronadura.
- Generar una base de datos con las variables del proceso y sus resultados.
- Generar un protocolo para la toma y análisis de fotografías.

## **1.4 Alcances**

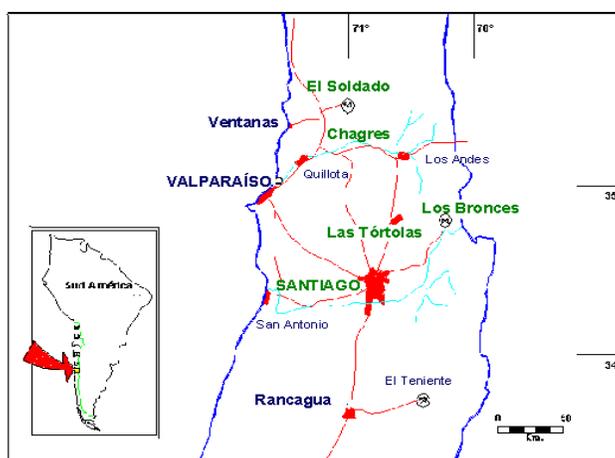
Para cumplir con los objetivos propuestos se estudiaron 13 disparos, tanto en mineral como en estéril. El rajo se encuentra sobre labores de la antigua mina subterránea explotada por el método de Sublevel Stopping, y un gran porcentaje de los disparos realizados (cerca del 80%) se encuentran en sectores de caserones rellenos (caving). Debido a ello y con el propósito de cuantificar la información que refleje la actual operación de la mina, se analizaron los disparos en la totalidad de los sectores: sectores de roca sana, sectores de caving y en sectores de borde. Los disparos analizados se encuentran ubicados en las Fases 2 y 3.

Las litologías dominantes en la mina son: Toba Brechosa, Andesita, Traquita y Veta Negra. Los disparos estudiados en su totalidad corresponden a sectores de mineral sulfurado, ubicados en los bancos 1265, 965, 950, 935 y 920.

## CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

### 2.1 Antecedentes generales

La mina El Soldado pertenece a Anglo American, se ubica en la quinta región en la cordillera de la costa a 132 kilómetros al norte de Santiago y a 600 metros sobre el nivel del mar, como muestra la figura 2. Abarca una superficie total de 8.000 hectáreas, con un área de operación cercana a las 1.200 hectáreas. El Soldado cuenta con cerca de 1.200 trabajadores entre personal propio y contratista. El año 2011 la producción total de cobre fue de 46.900 toneladas, donde cerca del 90% del cobre está contenido en concentrado y el resto pertenece a la producción de cátodos.



*Figura 2: Plano de ubicación de la faena El Soldado*

La mina comprende 7 Fases diseñadas, estando en la actualidad la Fase 2 y la Fase 3 en operación. En la figura 3 se muestra la disposición espacial de las fases y la producción contemplada de sulfuros y óxidos por fase desde el 2011 hasta el 2015.

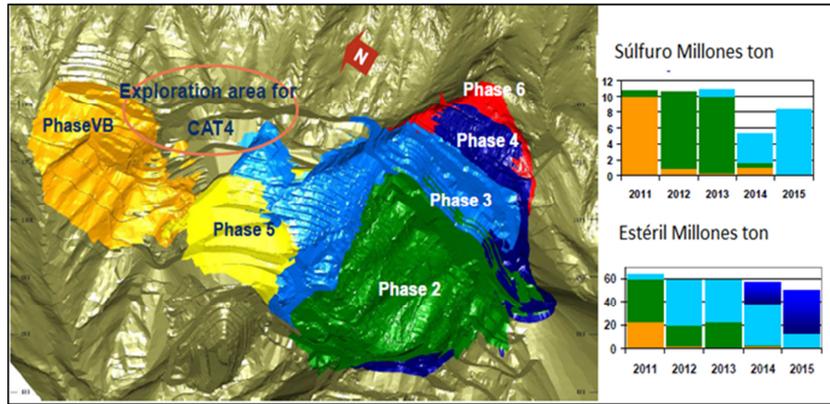


Figura 3: Ubicación de las fases dentro del rajo

De la mina a rajo abierto se obtiene mineral sulfurado y oxidado como se aprecia en la figura 4, el cual se procesa independientemente, obteniéndose como productos concentrado de cobre y cátodos de cobre respectivamente.

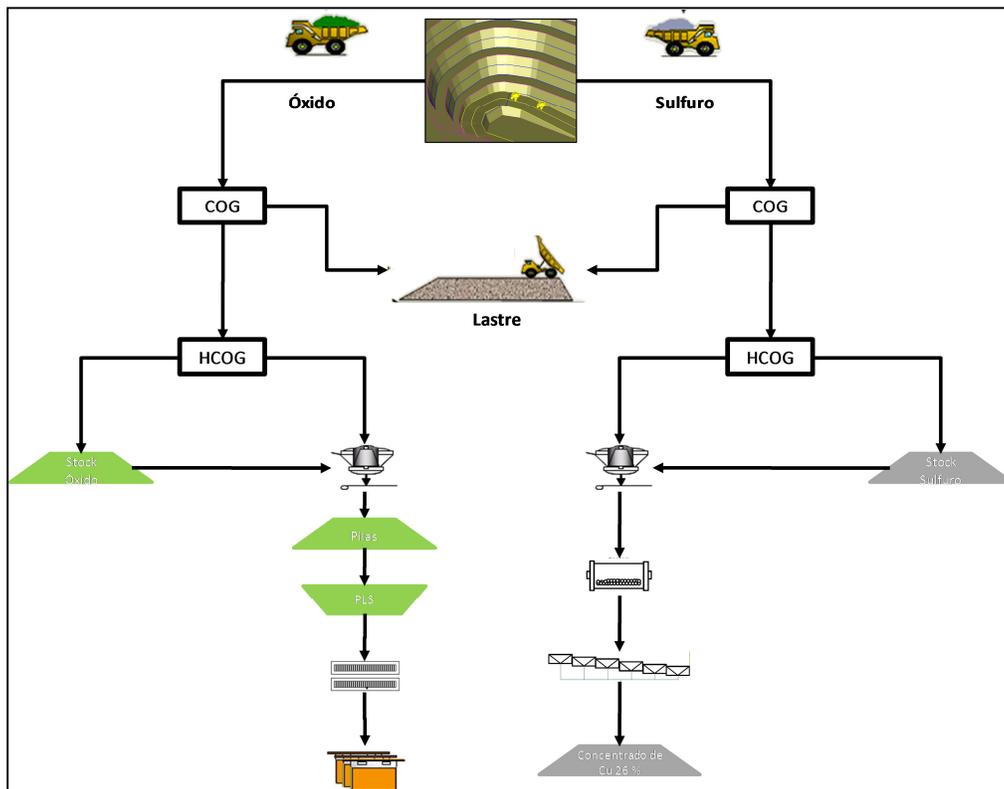
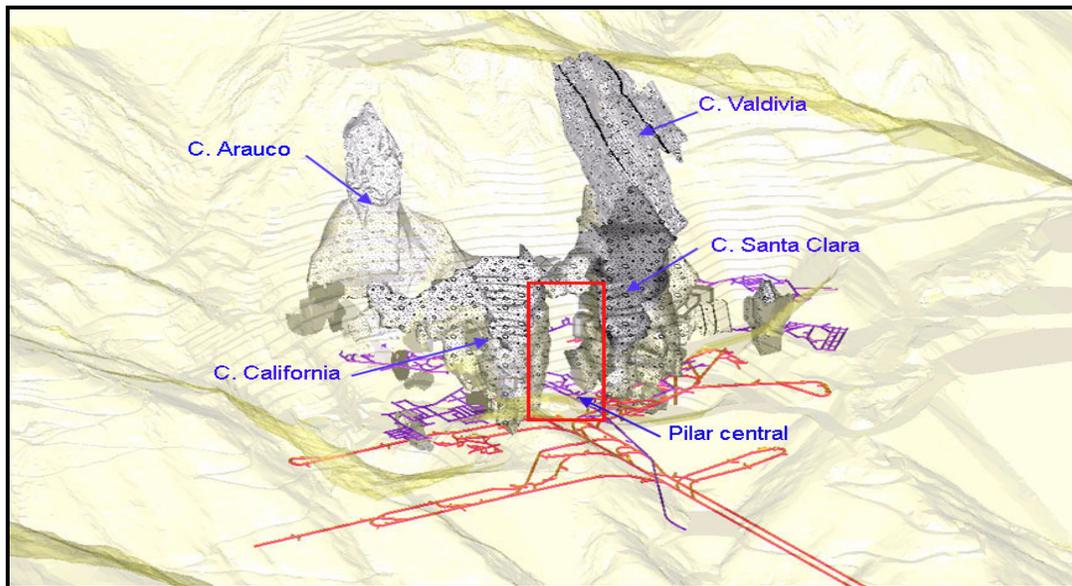


Figura 4: Flowsheet proceso mina-planta

La explotación de la mina se remonta varias décadas atrás, tanto a pequeña como a gran escala; es por ello que bajo el actual rajo existe una infinidad de labores subterráneas, principalmente asociadas a la explotación por caserones. Tras el cierre de la mina, varios de aquellos caserones separados por pilares se rellenaron con material estéril. Este sistema de caserones rellenos y caserones vacíos inestables, en conjunto con los pilares que los separan, conforman el sector de cavidades o caving. Las principales cavidades de la mina son: California, Santa Clara, Valdivia y Arauco. En la siguiente figura se observa la disposición espacial de las cavidades y el pilar central de sustento.



*Figura 5: Plano del sistema de cavidades de la mina*

## 2.2 Antecedentes geológicos

El yacimiento de Cobre El Soldado pertenece a la categoría de estratoligados, debido a que se emplazó en secuencias estratificadas. Existen evidencias de que el emplazamiento de los fluidos hidrotermales mineralizadores posee una importante componente estructural.

Mediante la siguiente secuencia de eventos se explica la génesis del yacimiento:

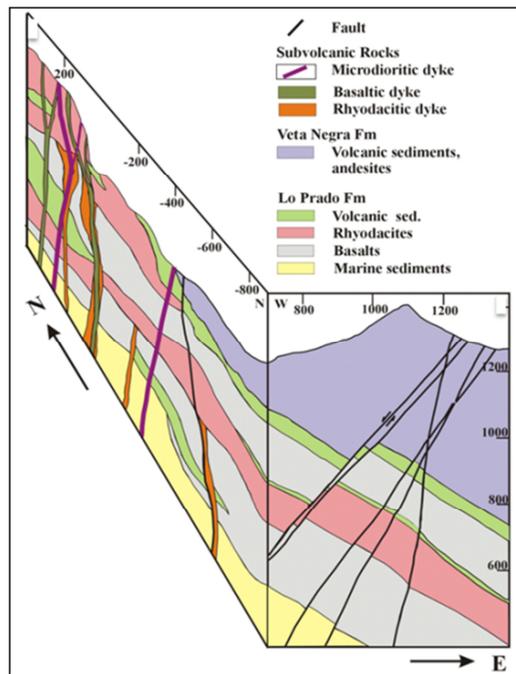
- Depositación de la formación Lo Prado Inferior, que se encuentra compuesto principalmente por sedimentos marinos.
- Desarrollo de la formación Lo Prado Superior, compuesto principalmente por volcanismo bimodal y domos riodácíticos.
- Depositación de la formación Veta Negra, compuesta por rocas volcánicas.
- Posteriores procesos de diagénesis generaron la formación de pirita framboidal por la reducción de sulfato.

- Como parte del desarrollo del arco magmático, se produjo el alzamiento con basculamiento y fallamiento normal y transtensional, que habría favorecido la penetración de flujos hidrotermales a través de zonas de debilidad.
- Depositación de sulfuros de Cu y Cu-Fe a partir de fluidos hidrotermales/metamórficos.
- Los cuerpos mineralizados se emplazan en un sistema estructural tipo lazo cimoide, el que controla las formas de los cuerpos y la distribución de la mineralización.

La formación Lo Prado es cortada por tres tipos de diques intrusivos sub-verticales:

- Diques félsicos.
- Diques máficos a intermedios.
- Diques microdioríticos.

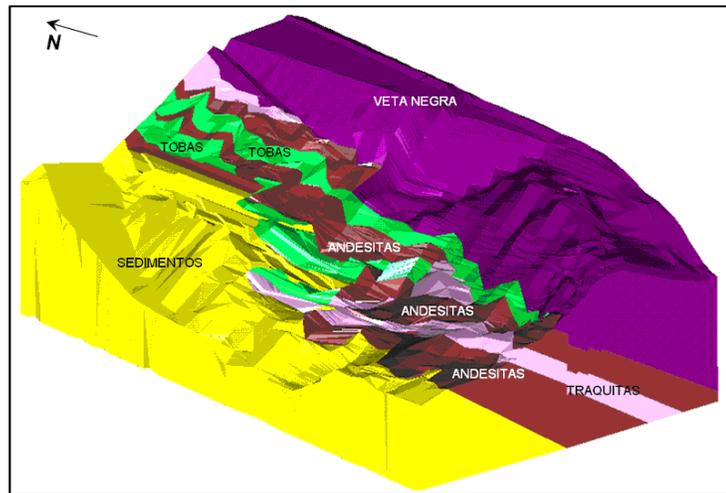
Cabe señalar que estos diques intrusivos se encuentran relativamente lejos del yacimiento, a excepción de numerosos diques de composición traquítica y andesítica que intruyen a la secuencia estratificada como se indica en la Figura 6.



**Figura 6: Distribución geológica espacial del yacimiento El Soldado**

La mina presenta 4 litologías dominantes, como se muestra en la figura 7:

- Toba Brechosa
- Andesita
- Traquita
- Veta Negra



*Figura 7: Litologías dominantes de la mina*

Actualmente la estratificación presenta un rumbo N-S y una inclinación de 30° hacia el Este. Existen sistemas de fallas subverticales que cortan y desplazan las unidades estratificadas, este complejo sistema estructural está formado por fallas regionales N-S que conforman el set de fallas transtensionales principales, y una serie de fallas menores.

La mineralización económica es de tipo hipógena y está compuesta principalmente por calcopirita, bornita, calcosina y covelina en menor proporción. Se encuentran en forma de vetillas y diseminada, pero también se encuentran en el relleno de porosidades primarias y secundarias de rocas volcánicas. La mineralización presenta una geometría irregular que es controlada principalmente por la intersección de estructuras o asociada al emplazamiento de diques.

### **2.3 Antecedentes mina-planta**

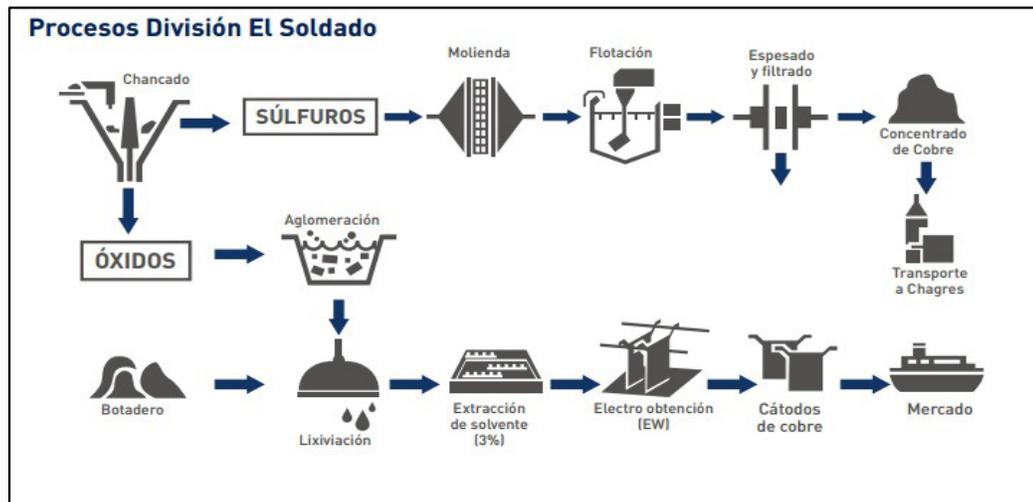
El presente acápite tiene por finalidad repasar cada una de las etapas o procesos que involucran tanto el arranque, extracción, movimiento y procesamiento del mineral. En la figura 8 se muestra el esquema productivo de la mina, donde la alimentación tanto a la planta de sulfuros como a la planta de óxidos proviene exclusivamente de la mina a rajo abierto.

Para el caso de los sulfuros los procesos estudiados son:

- Perforación y tronadura
- Carguío y transporte
- Chancado
- Molienda convencional y SAG
- Flotación de sulfuros
- Flotación de arenas
- Filtro – espesamiento

Para el caso de los óxidos los procesos estudiados son:

- Perforación y tronadura
- Carguío y transporte
- Chancado primario
- Chancado secundario, terciario y aglomeración
- Lixiviación
- Extracción por solventes
- Electro obtención



*Figura 8: Esquema productivo de la mina*

### 2.3.1 Perforación y tronadura en El Soldado

La perforación y tronadura debe cumplir con los resultados esperados; es decir, fragmentar un volumen de roca en un periodo específico y con un producto de granulometría acorde a las exigencias de los procesos aguas abajo. La perforación está diseñada para generar pozos que se llenan con la cantidad de explosivo necesario para liberar la energía de fragmentación, y las

dimensiones de la malla de perforación están íntimamente relacionadas con la energía aplicada al macizo rocoso por metro cúbico.

### **1) Restricciones**

La perforación y la tronadura en la mina está fuertemente restringida por:

- **Restricciones ambientales:** Debido a que la faena se encuentra situada cerca de comunidades rurales, el diseño de la tronadura debe cumplir con el objetivo fundamental de no sobrepasar los niveles de ruido y de sismicidad establecidos.
- **Restricciones operacionales:** Dentro de las principales restricciones se encuentra el área reducida de operación de las perforadoras y su interferencia con el resto de los equipos de la mina.
- **Restricciones geomecánicas:** Debido a que la mina se encuentra emplazada dentro de un sector con múltiples fallas mayores y fallas menores que la cruzan en varias direcciones, la estabilidad de las paredes finales del rajo se ve fuertemente afectada. Esto exige que la perforación y tronadura sea diseñada cuidadosamente para minimizar el efecto de las ondas vibratorias producidas. Otra restricción importante se origina en las diversas labores mineras subterráneas y zonas de hundimiento que se encuentran debajo del rajo. En suma, tanto la perforación como la tronadura están sujetas a un protocolo de diseño y de operación riguroso, que debe considerar no sobrepasar los márgenes dados. Así se restringe el manejo de un gran número de variables, donde sus valores están acotados dentro de una vecindad rígida.

### **2) Dominios de perforación y tronadura**

Los dominios de perforación y tronadura se crean por la necesidad de contar con una malla de perforación que cumpla con los objetivos en cada zona de la mina y no de una litología en particular. Actualmente en Fase 2 se distinguen los sectores de roca sana, borde y caving. En Fase 3 se distinguen los sectores de roca sana y borde. A continuación se describen los 3 sectores presentes en la mina.

#### **a) Zona de roca sana**

Dentro de esta categoría se aplican 5 alternativas de mallas de perforación, dependiendo principalmente del cuidado que se le quiera dar a la pared del rajo. Evidentemente la pared final requiere un cuidado mayor; así lo que varía principalmente es el Burden y el Espaciamiento tanto del buffer como del precorte, además del diámetro de perforación. A continuación se presenta la alternativa 1 que es la más usada, en los anexos se incluyen las 5 alternativas. Cabe señalar que en

el transcurso de este estudio en Fase 2 se usaron mallas de 7x8 [mxm] y de 6x7 [mxm], mientras que en Fase 3 sólo se usan mallas de 7x8 [mxm].

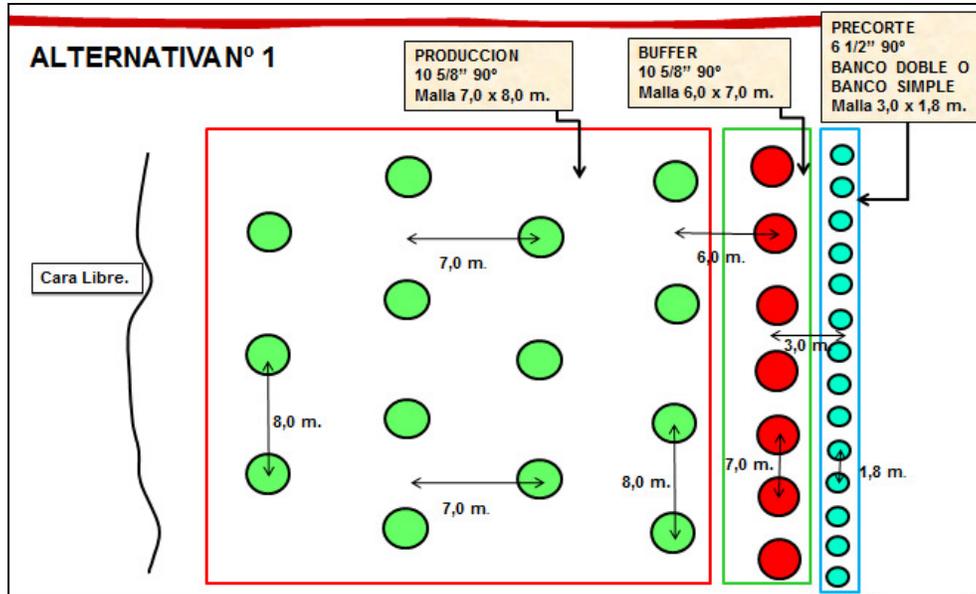


Figura 9: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para la zona de roca sana

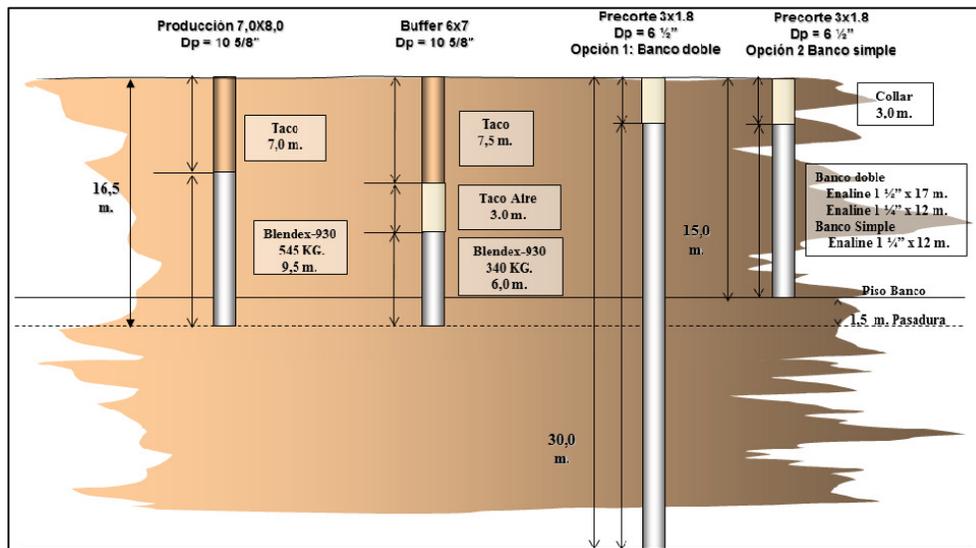


Figura 10: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para la zona de roca sana

## b) Zona de borde

La zona de borde se forma por la depositación de material fino y de bolones de los bancos superiores en la orilla del banco inferior, esta zona entonces se conforma de roca sana en el fondo y un pequeño volumen del material adicionado en la superficie. Aunque esta zona representa un área minúscula dentro de la operación, es necesario crear una malla que sea lo suficientemente pequeña como para fragmentar los bolones dentro del material fino. En las siguientes figuras se muestra la configuración de la malla.

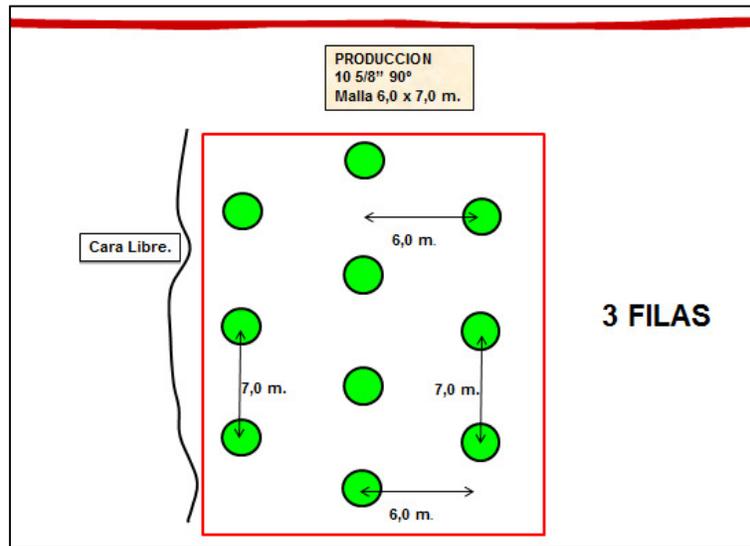


Figura 11: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para la zona de borde

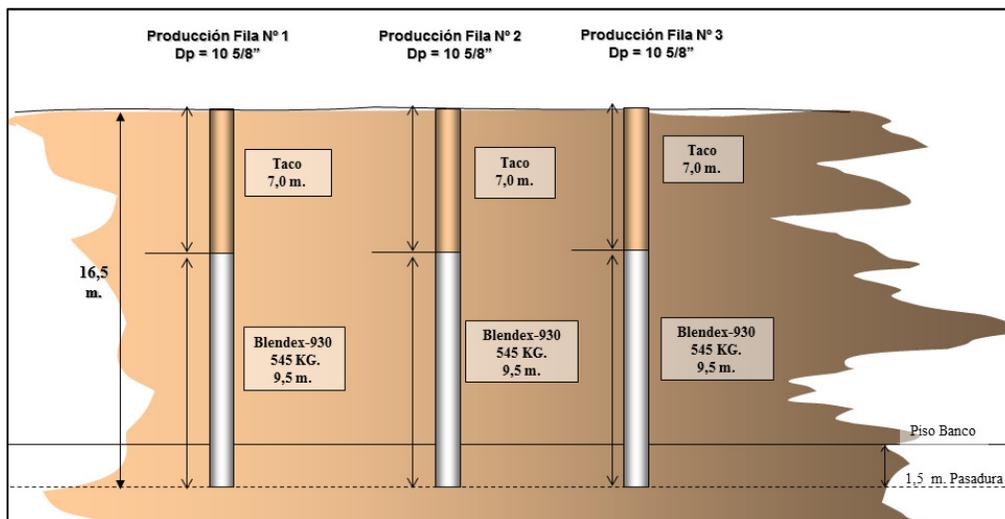
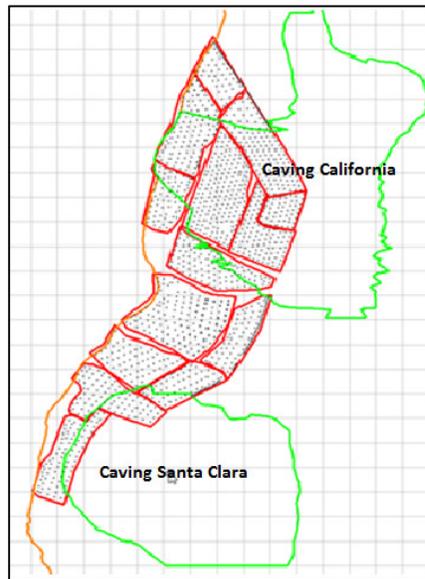


Figura 12: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para zona de borde

### c) Zona de cavidades

Se denomina zona de cavidades a la zona compuesta por material fragmentado, roca sana, caserones semi-rellenos y pilares. Se conoce comúnmente como zona de caving, debido a que los caserones vacíos de la mina subterránea comenzaron a socavarse y a expandirse, lo que produjo una zona de hundimiento que posteriormente fue rellenada con material estéril. Un gran porcentaje de los disparos tronados se encuentran en parte o totalmente dentro de esta zona. En la Fase 2 se encuentra el caving California y el Santa Clara como muestra la siguiente figura.



**Figura 13: Zona de caving Fase 2**

Los principales inconvenientes de esta zona es que en algunos sectores existe roca muy fracturada, lo que hace que el pozo perforado en ocasiones colapse, teniendo que repasarse nuevamente. La fuga de gases es otro inconveniente, debido a que se pierde energía vital para la fragmentación. Un problema no menos importante es la generación de gases nocivos, debido a la combustión incompleta de los explosivos, principalmente debido al uso de un confinamiento insuficiente, con lo cual un porcentaje del explosivo sólo deflagra y no detona. Como la eficiencia energética del explosivo es menor que en roca sana, se diseña una malla de perforación más pequeña comparada con las mallas utilizadas en roca sana, como se muestra en las siguientes figuras.

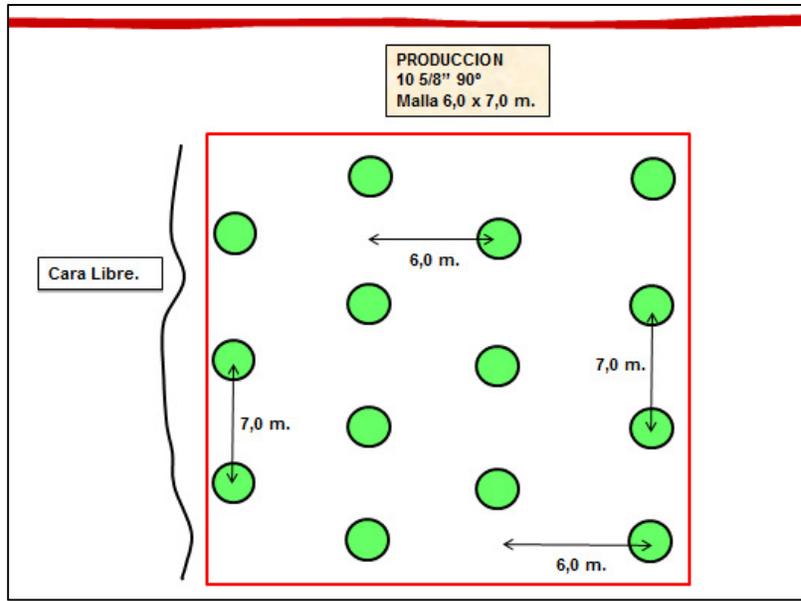


Figura 14: Vista en planta del dominio de perforación y tronadura para zona de caving

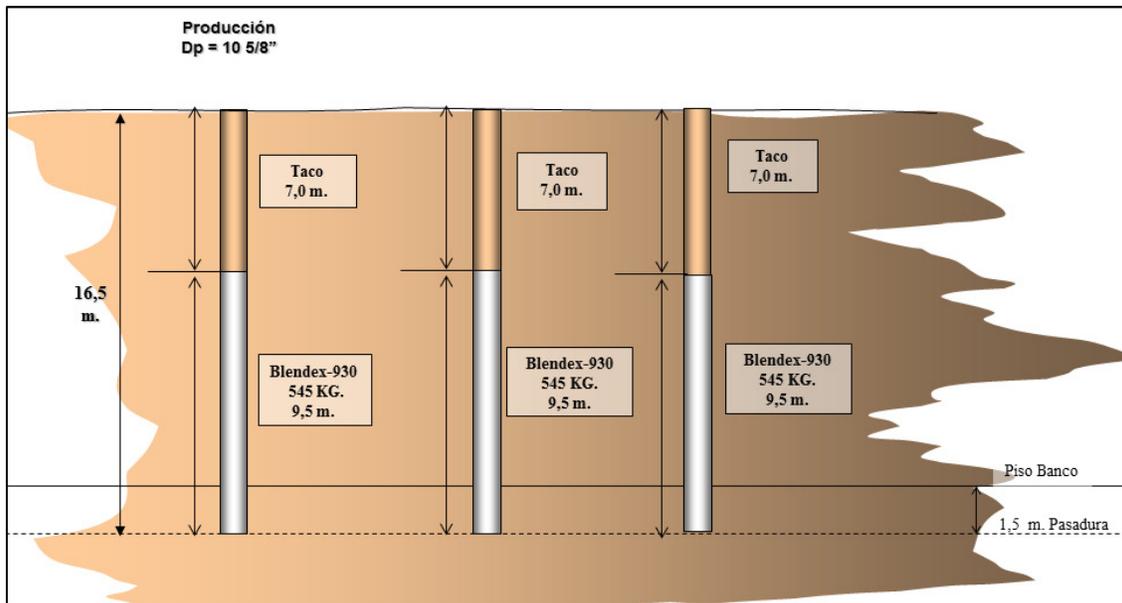
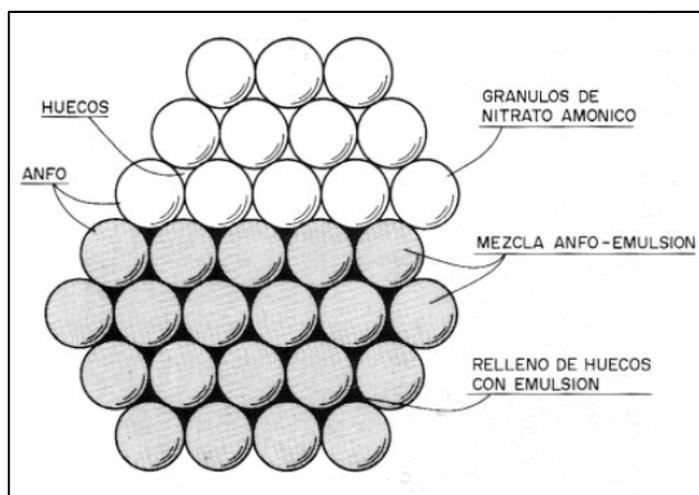


Figura 15: Vista longitudinal del dominio de perforación y tronadura para zona de caving

### 3) Explosivos utilizados

El explosivo utilizado en la faena es el Blendex, que se categoriza como un Anfo pesado vaciable; es decir, una mezcla de Anfo y de Emulsión o matriz que reúne las principales propiedades de ambos componentes: alta energía, buena generación de gases y en algunos casos resistencia al agua. Por ejemplo, el Blendex-930 contiene un 30% de Emulsión y un 70% de Anfo; el Blendex-950 contiene un 50% de Emulsión y un 50% de Anfo, etc. La función de agregarle emulsión al Anfo es aumentar el poder rompedor del explosivo, mediante el aumento de la densidad del mismo. La emulsión llena los huecos intersticiales que deja el Anfo, actuando como matriz energética que aumenta las propiedades rompedoras del explosivo. En la siguiente figura se muestra la estructura del Anfo pesado.



**Figura 16: Estructura del Anfo pesado**

En condiciones normales de operación en la mina se utiliza el explosivo Blendex-930; pero en otras condiciones, principalmente en presencia de agua, el tipo de explosivo varía. En la siguiente tabla se resume el tipo de explosivo usado y la condición de operación.

**Tabla 1: Explosivos utilizados en la mina El Soldado**

Explosivo utilizado	Condición de operación
Blendex-930	Suelo seco
Blendex-950	Presencia de humedad
Emultex	Presencia de agua
Anfo	En pruebas

### 2.3.2 Carguío y transporte

Luego de generar la pila de material tronado se procede a su extracción para ser trasladado al chancador o al acopio en el caso del mineral, y al botadero en el caso del estéril. La extracción se realiza con palas electrohídricas y con cargadores frontales. Existen 2 palas Komatsu PC-5500 frontal con capacidad de balde de 37 [yd<sup>3</sup>], 2 palas Komatsu PC-5500 excavadora con capacidad de balde de 37 [yd<sup>3</sup>] y 1 pala PC-8000 frontal con capacidad de balde de 55 [yd<sup>3</sup>] (figura 17). Los cargadores son 3 Marathon LT L1850, con capacidad de balde de 31 [yd<sup>3</sup>] y 4 Caterpillar con capacidad de balde de 24 [yd<sup>3</sup>]. El material se traslada en camiones Komatsu 830 de 240 toneladas de capacidad y en camiones Caterpillar 785 B de 150 toneladas.



*Figura 17: Pala Komatsu frontal PC-8000*

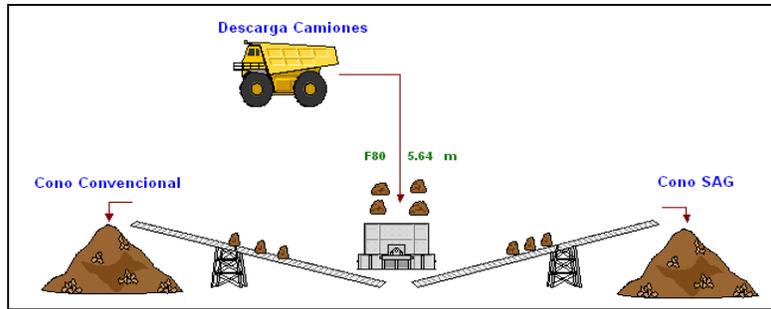
### 2.3.3 Procesamiento de minerales

Como se ha mencionado, el yacimiento contiene tanto minerales sulfurados como oxidados, los cuales son procesados en una planta concentradora por flotación en el caso de los sulfuros, y en una planta de lixiviación SX-EW (cátodos) para el caso de los óxidos. La planta concentradora tiene una capacidad de tratamiento de 8,1 [mtpa], procesando el 84% del mineral, mientras que la planta de cátodos procesa mineral oxidado con una capacidad de producción de cátodos de 22 [tpd] con una pureza del 99,992%.

#### 1) Planta de sulfuros

##### a) Chancado primario

El mineral que ingresa al Chancador primario es alimentado directamente del material tronado y del acopio. El chancador es de marca Allis Chalmers de 42"x65" de 300 [KW], el cual abastece los stockpile de la molienda convencional y molienda SAG. En la figura 18 se muestra el diagrama de chancado primario para la planta de sulfuro.

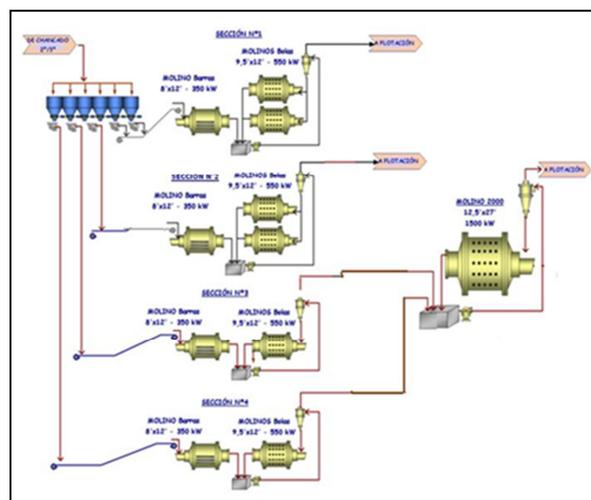


**Figura 18: Diagrama chancado primario sulfuro**

**b) Planta convencional**

Esta Planta cuenta con chancado secundario y terciario; el proceso se divide en dos secciones, cada una cuenta con un chancador Symons de 5 ½', un chancador Sandvik H7800 y un harnero de 8'x20' de doble bandeja. Esta planta procesa el 100% de los pebbles generados por el molino SAG, lo que representa el 60% del tratamiento del chancado secundario/terciario. El 40% restante de la alimentación proviene desde el chancado primario. El 80% del producto chancado fino de la planta es alimentado a la molienda convencional y el 20% restante es alimentado al molino SAG. El producto final de esta etapa, entrega un P80 de 5,5 [mm].

La molienda convencional cuenta con 4 molinos de barras de 8'x12', 5 molinos de bolas de 9 ½'x12', 1 molino de bolas de 12,6'x27' y un molino de repaso, los cuales se distribuyen en 4 secciones, como se muestra en la siguiente figura. El producto generado es enviado a flotación con un tamaño de 195 micrones.



**Figura 19: Diagrama molienda convencional**

### c) Planta molienda SAG

El circuito SAG, por otro lado, cuenta con un molino SAG de 17`x34`, el cual está en circuito cerrado de pulpa y circuito abierto para los pebbles. Este circuito recibe un producto de 110 [mm] desde el Chancado primario y entrega un producto final a flotación de un tamaño de 195 micrones.

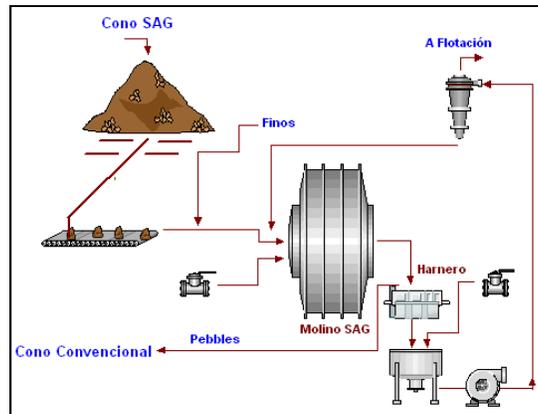


Figura 20: Diagrama molienda SAG

### d) Flotación de sulfuros

En la figura 21 se observa el diagrama completo de flotación. Los relaves rougher y scavenger constituyen el relave sulfuros de la planta y son impulsados hasta la planta de flotación de arenas.

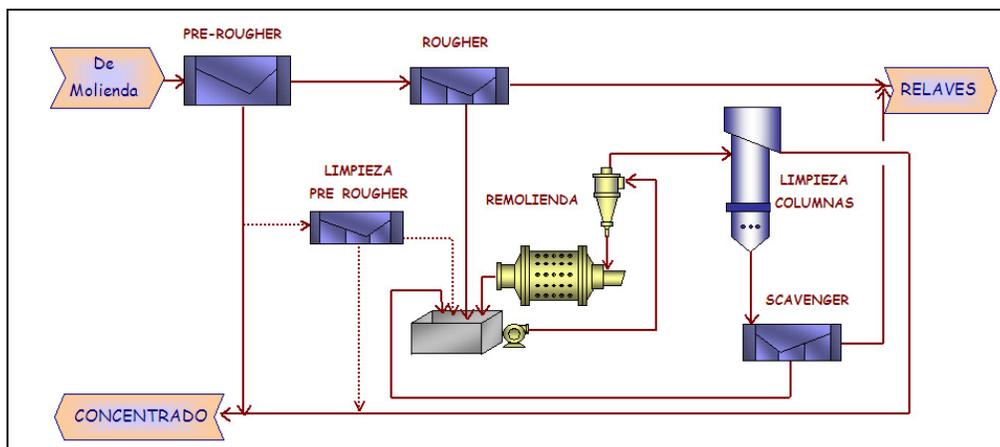


Figura 21: Diagrama flotación sulfuros

### e) Flotación de arenas

El relave de la flotación sulfúros es alimentado a una batería de 12 ciclones de 20" de diámetro para su clasificación. Las lamas se retornan al sistema de transporte de relave y las arenas son reprocessadas en el circuito de flotación de arenas.

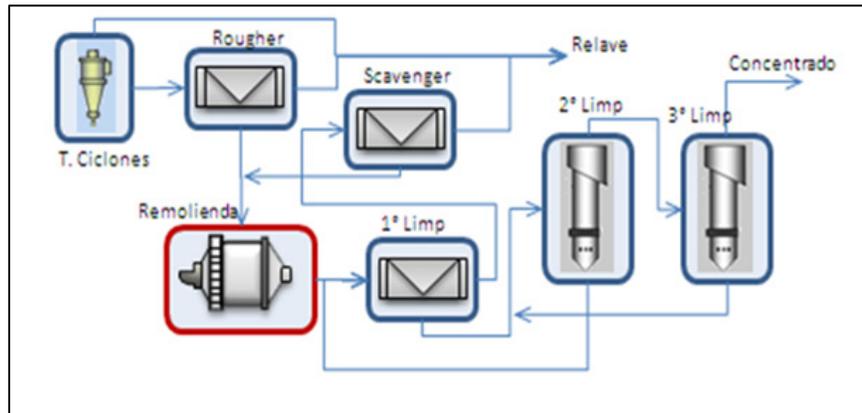


Figura 22: Diagrama flotación arenas

### f) Filtro – espesamiento

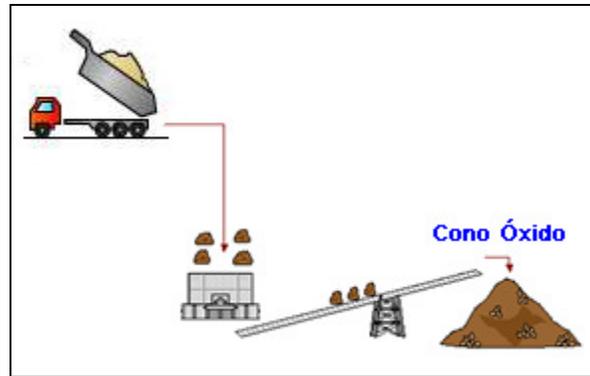
Dos espesadores conforman la planta, cuyo diámetro es de 20 [m]; además cuenta con un clarificador de 12,2 [m] de diámetro, cuya finalidad es procesar el líquido filtrado. La alimentación al filtro proviene desde ambos espesadores y eventualmente desde el clarificador.

Actualmente la planta cuenta con dos filtros de prensa, uno es de placas verticales, FP125 de 150 [m<sup>2</sup>] y el otro es un filtro de prensa Larox de placas horizontales, FP 19/9 DE 19 [m<sup>2</sup>].

## 2) Planta de óxidos

### a) Chancado primario

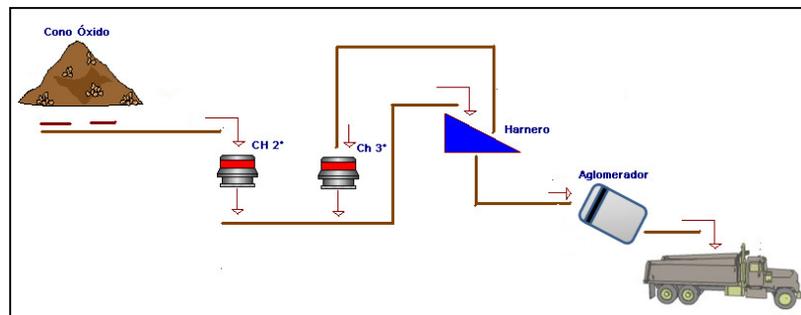
El mineral oxidado recibido entra a un chancador primario Norberg de 5' de 110 [KW], el cual abastece los stockpile de la planta de chancado secundario/terciario (figura 23).



**Figura 23: Diagrama chancado primario óxido**

### b) Planta chancado secundario/terciario y aglomeración

En esta planta de chancado secundario/terciario existe un chancador secundario Symons de 5 ½' estándar, un chancador terciario Symons de 5 ½' de cabeza corta y un harnero de 8' x 20'. El producto bajo ½" es enviado a la etapa de aglomeración. En la etapa de aglomeración, el mineral es aglomerado con agua y ácido sulfúrico en un tambor rotatorio de 1,8 x 5,3 [mxm] a una velocidad de 8 [rpm].



**Figura 24: Diagrama chancado secundario óxido**

### c) Lixiviación

El producto entrante es regado con una solución ácida. Esta etapa contempla 4 pilas a una altura media de 2,5 [m]. La superficie total de lixiviación se encuentra distribuida por sectores. El tiempo total de lixiviación es de 15 días que se divide en dos ciclos, primeramente el mineral es regado con una solución ILS y luego con una solución Refino.

#### d) Extracción por solventes

Esta planta consta de una configuración 2E x 2S, con un flujo de 125 [m<sup>3</sup>/hr], funcionando en continuidad orgánica y con eficiencias de extracción mayores al 90%. El circuito de soluciones es en contracorriente con el orgánico, respetando para la etapa una razón O/A de 1,1:1 y de re-extracción A/O de 4:1. En la figura 25 se muestra el diagrama.

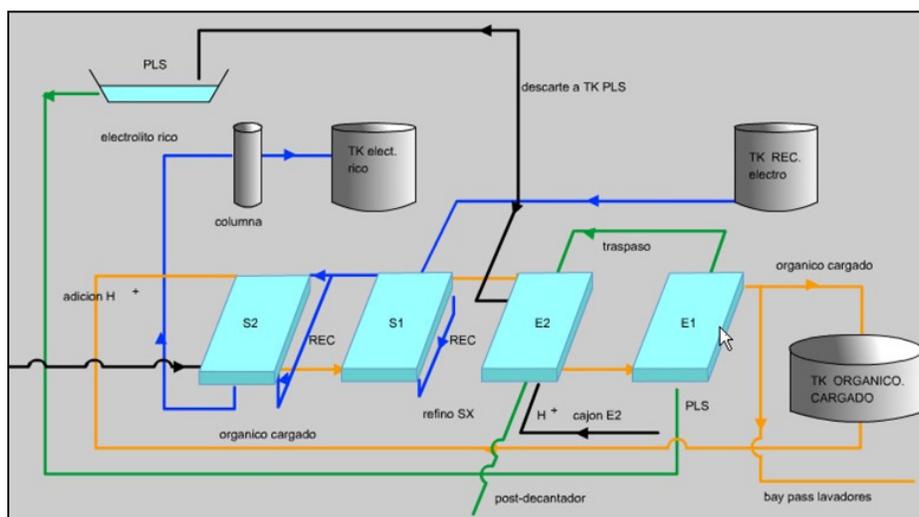


Figura 25: Diagrama planta extracción por solventes

#### e) Electro obtención

La planta cuenta con 55 celdas para una producción de 22 [ton/día] con una pureza del 99,992%, aplicando un amperaje máximo de 17,5 [kA], con una eficiencia de corriente del 92%. Las celdas contienen 30 cátodos y 31 ánodos.

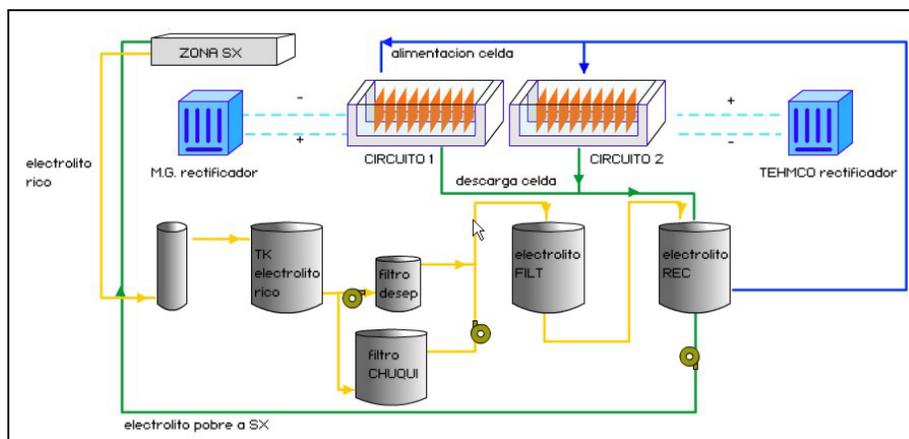


Figura 26: Diagrama planta electro obtención

## **2.4 Antecedentes bibliográficos**

A continuación se presentan una serie de estudios, los que sirven de apoyo para esta memoria.

### **2.4.1 Aumento de tonelaje de la molienda SAG mediante modificaciones en la operación minera en El Soldado [1]**

Este estudio tuvo como objetivo principal encontrar una curva granulométrica de mineral post-tronadura que optimice la operación del molino SAG. Para ello se analizó el proceso conjunto desde la mina a la planta.

La mina El Soldado el año 2004, en su afán de lograr un mejoramiento continuo, realizó cambios a nivel planta, adicionando material fino al molino SAG, para aumentar así su rendimiento horario. También se realizaron cambios a nivel mina, variando los diseños de la malla de perforación y el tipo de explosivo.

La metodología utilizada consistió en ajustar las bases de datos de la situación original de operación y de la situación “mejorada”, mediante el uso de un modelo granulométrico conocido. Luego de logrado lo anterior, las curvas obtenidas se ingresaron a un simulador utilizando el programa JKSimMet; con ello se logró encontrar el máximo rendimiento del molino SAG. Una vez conocida la curva óptima de alimentación al SAG, se procedió a utilizar un modelo predictivo granulométrico, luego se calcularon las variables de la perforación y tronadura que permitieron la obtención de la curva óptima.

Este trabajo permite concluir que una combinación de tamaños finos y gruesos es lo que da origen a un mayor rendimiento en la molienda SAG. Para lograr lo anterior se propuso el cambio del tipo de explosivo por uno de mayor densidad, además de achicar la malla de perforación; vale decir un ajuste en el factor de carga.

El beneficio neto utilizando los cambios propuestos fluctúa entre 0,6 a 2,4 millones de dólares anuales, dependiendo del precio del metal.

### **2.4.2 Estudio de las variables mina-planta y su incidencia en el tratamiento horario en molinos SAG, mina Los Bronces [2]**

Los objetivos principales de este trabajo fueron:

- Identificar y analizar las variables mina-planta que influyen en la capacidad de tratamiento horario en molinos SAG.
- Maximizar la capacidad de tratamiento horario de la planta de molienda SAG, mediante la optimización de las variables relevantes encontradas.
- Realizar un análisis técnico-económico del ajuste de las variables relevantes.

Para evaluar los efectos de las variables mina-planta, se procedió a analizar imágenes post-tronadura, en la salida del chancador primario y en la alimentación al molino SAG. Para ello se usó el programa de análisis de imágenes Wip Frag, el cual entregó las curvas granulométricas resultantes. Luego se estudió el efecto de las variables en la granulometría y en la capacidad de tratamiento de la planta, las variables relevantes son:

- Tipo de roca
- Tipo de alteración
- Estructuras mayores
- Frecuencias in-situ
- Malla de perforación
- Factor de carga
- Secuencia de salida de los pozos
- Índice de dureza de la perforación

A continuación se indican algunos resultados y conclusiones importantes:

- Se observó que el factor de carga y la granulometría post-tronadura presentaron una relación inversamente proporcional.
- La granulometría post-tronadura mejoró con el uso de detonadores electrónicos.
- Los mejores retardos entre pozos son de 3 [ms] y entre filas son de 17 [ms].
- A mayor alimentación de finos, el molino SAG aumenta su rendimiento, los tamaños intermedios presentan un descenso notorio en el rendimiento y el aumento de gruesos no presenta una tendencia clara. Los tamaños finos están entre  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{2}$ ", los intermedios de 1" a 3" y mayor a 6" se encuentran los tamaños gruesos.

#### **2.4.3 Análisis granulométrico Fase 2 en mina El Soldado Anglo American Chile [3]**

El objetivo principal de este análisis fue determinar la incidencia en la granulometría al variar la malla y el explosivo en 3 litologías dominantes: Toba, Andesita y traquita.

Se analizaron 4 disparos utilizando mallas 6x7 [mxm], 7x8 [mxm] y 8x9 [mxm], utilizando los explosivos Blendex-930, Blendex-950 y Emultex. Los resultados se procesaron utilizando el programa Split y también Wipfrag.

Se obtuvieron resultados granulométricos de 4,89 pulgadas a 8 pulgadas, siendo la principal conclusión que el factor de carga es la variable dominante en el proceso de tronadura.

#### **2.4.4 Simulación y validación de tronaduras mediante análisis granulométrico en proceso “mine to mil”, mina El Soldado [4]**

El objetivo principal del estudio fue validar el modelo de predicción granulométrica del software JKSimblast, mediante el análisis de imágenes, para luego generar una predicción granulométrica con un error menor al 10%. También se realizó una zonificación lito-estructural característica del macizo rocoso, para generar la información requerida por el software JKSimblast y así realizar simulaciones granulométricas en las distintas unidades geotécnicas.

Con todo lo anterior se diseñó una malla de perforación óptima para cada zona lito-estructural de la mina.

Como resultado principal se logró obtener un modelo predictivo granulométrico por zona, cuyo error es menor al 10%. Cabe señalar que el modelo es aplicable solamente a la mina El Soldado.

#### **2.4.5 Análisis geotécnico para la estimación de la fragmentación en tronaduras en minas a rajo abierto, mina Chuquicamata [5]**

El objetivo principal de este estudio fue generar un modelo de predicción granulométrica que incorpore tanto variables de diseño de perforación y tronadura, como también variables geo-estructurales. Se tomó como base los modelos de Kuz-Ram y de Cheng & Katsabanis, considerando las variables del modelo de Kuz-Ram e incorporando además las siguientes nuevas variables:

- Resistencia a la compresión, tracción y corte
- Densidad de la roca
- Velocidad de propagación de las ondas sísmicas
- Impedancia
- Capacidad de deformación plástica
- Estructuras
- Porosidad
- GSI
- Frecuencia de fracturas
- Módulo de Young
- Work index
- Constante de Hoek & Brown para la roca intacta ( $m_i$ )

Luego se realizó un análisis estadístico multivariable, generando una matriz de correlación entre las variables, agrupándolas y eliminando las menos representativas, así se logró crear el modelo de predicción granulométrica definitivo.

Como resultado principal del estudio se confirmó una buena correlación de los valores estimados con los reales. Además una ventaja importante del modelo es que aplica variables tanto cualitativas como cuantitativas, donde algunos parámetros son calculados directamente en

terreno con la asignación de puntajes, lo que le entrega un grado de objetividad mayor a las estimaciones.

#### **2.4.6 Predicción granulométrica en tronadura y su incidencia en el proceso productivo, mina El Soldado [6]**

El objetivo principal de este estudio es validar el modelo de predicción granulométrica de Kuz-Ram, para ello se procedió a analizar tronaduras tanto en mineral como en estéril. Luego se ajustó el modelo, obteniendo errores menores al 5% y se analizó de qué manera inciden las diferentes distribuciones granulométricas en los rendimientos de los procesos de carguío y en la molienda SAG.

Con el modelo ajustado se probaron diferentes combinaciones de malla y se realizó el cálculo económico del proceso conjunto mina-planta, encontrando un óptimo global. La recomendación es utilizar una malla para estéril y una malla para mineral.

## CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

### 3.1 Termoquímica de los explosivos

Los explosivos comerciales son el producto de la mezcla entre sustancias combustibles y sustancias oxidantes, capaces de reaccionar rápida y violentamente, dando por resultado la generación de un gran volumen de gases. La mayoría de los explosivos comerciales utilizan nitratos como oxidantes, siendo el nitrato de amonio el material básico de fabricación. También son usados el nitrato de Sodio, de Calcio, de Potasio y algunos compuestos orgánicos tales como aminas y hexaminas.

Una cierta cantidad de explosivo inserto en un lugar y en las condiciones adecuadas libera la energía necesaria para fragmentar un volumen específico de roca. Los resultados de fragmentación, desplazamiento y vibraciones se pueden predecir mediante las propiedades de cada grupo de explosivos.

Dentro de las características más importantes de los explosivos se encuentran la potencia y energía desarrollada, velocidad de detonación, resistencia al agua, sensibilidad y el volumen de gases.

La detonación es un proceso termoquímico caracterizado por su gran velocidad de reacción y la formación casi instantánea de productos gaseosos a elevada temperatura y presión, adquiriendo una gran fuerza expansiva que produce efectos mecánicos y sonoros. Existen explosivos mecánicos, eléctricos, nucleares y químicos. Desde el punto de vista de esta memoria interesa sólo estudiar las explosiones producidas mediante reacciones químicas.

Los explosivos se pueden clasificar según:

#### 1 La velocidad de propagación de la reacción

- Deflagrantes: Producen una reacción química más rápida que una simple combustión, se propaga a velocidades del orden de 400 a 800 [m/seg]. No produce una energía de choque o de detonación, solamente produce energía de explosión o del gas. El ejemplo más conocido es la pólvora negra.
- Detonantes: Producen una reacción química muy violenta, que se propaga a través de una columna explosiva acompañada de una onda de choque a una velocidad del orden de 2000 a 8000 [m/seg]. El ejemplo más conocido son las dinamitas.

## 2 La energía de iniciación requerida

- Primarios: Son aquellos que sólo requieren de una mínima cantidad de energía para alcanzar el estado de detonación; por ejemplo una llama, una chispa o un golpe.
- Secundarios: Son aquellos que requieren de una gran energía de iniciación, proporcionada generalmente por el impacto de la onda de choque de un explosivo primario.

## 3 Su composición química

- Explosivos propiamente tales: Son compuestos químicos, orgánicos o inorgánicos, que por sí solos pertenecen a la categoría de explosivos, es decir, no necesitan mezclarse con ningún otro compuesto. Un ejemplo lo constituyen la Nitroglicerina (NG) y el Trinitrotolueno (TNT).
- Mezclas entre compuestos químicos propiamente tales con otros que no lo son: Un ejemplo bien conocido son las dinamitas.
- Mezcla de compuestos químicos reductores con compuestos oxidantes: En esta categoría ninguno de los compuestos puede catalogarse como un explosivo propiamente tal, también llamados agentes explosivos, donde el ANFO es el ejemplo más conocido y representativo.

### 3.2 Mecanismos de fragmentación de la roca mediante el uso de explosivos

En el proceso de rompimiento y desplazamiento del material utilizando explosivos detonantes o altos explosivos confinados, se definen las siguientes etapas:

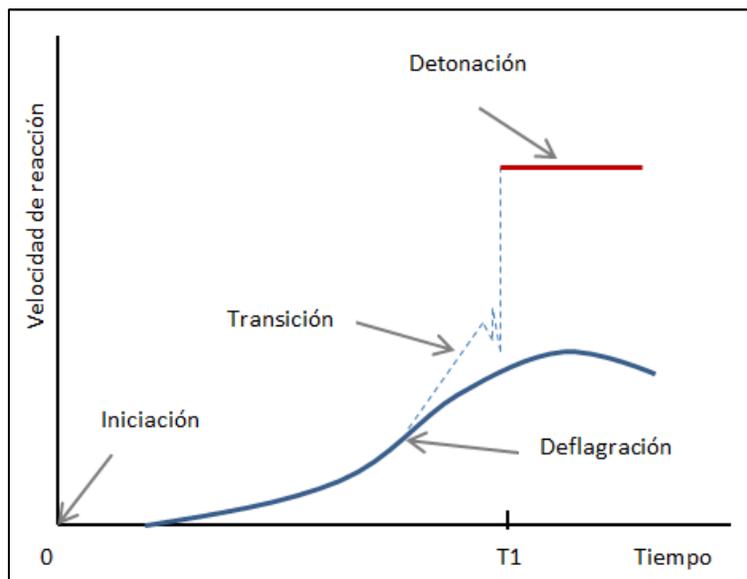
1. Detonación.
2. Trituración de la roca.
3. Agrietamiento radial.
4. Reflexión de la onda de choque.
5. Extensión y apertura de las grietas radiales.
6. Fracturamiento por descompresión.
7. Rotura por flexión.
8. Rotura por colisión.

## 1. Detonación

La detonación es un proceso físico-químico que se caracteriza por tener una elevada velocidad de reacción y formación de un gran volumen de productos gaseosos a una elevada temperatura, debido a la interacción de los ingredientes básicos de los explosivos (combustibles y comburentes). Cuando las moléculas dentro de la carga explosiva tienen una velocidad de reacción tan grande, transfieren su calor por choque a la zona inalterada de la carga, deformándola y produciendo su calentamiento, lo que conduce a la formación de “puntos calientes” que se desencadenan mediante un proceso adiabático. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa explosiva y se denomina onda de choque.

Cuando el explosivo se inicia, se produce la onda de choque o presión de detonación que es la portadora de la energía necesaria para activar las moléculas de la masa del explosivo alrededor del foco inicial energizado, provocando así una reacción en cadena.

Una vez producida la onda de choque, la masa del explosivo que ha reaccionado produce una gran cantidad de gases que ejercen una presión secundaria. Si la presión de los gases actúa sobre el resto de la masa sin detonar, su efecto se suma al de la presión de detonación, pasando de un proceso de deflagración a otro de detonación como muestra la siguiente figura.



*Figura 27: Proceso de deflagración – detonación*

## 2. Trituración de la roca

En los primeros instantes de la detonación la onda de choque se expande en forma cilíndrica, la presión que ejerce supera ampliamente la resistencia a la compresión de la roca, por lo que se provoca la destrucción de la estructura intercrystalina e intergranular cercana al pozo, esto es de 2

a 4 veces el diámetro del pozo. Estimaciones indican que este mecanismo de rotura consume casi el 30% de la energía que transporta la onda de choque.

### **3. Agrietamiento radial**

Debido a la intensa compresión radial a que es sometida la roca, se generan componentes de tracción en los planos tangenciales a la onda de choque, con ello se genera una intensa zona de grietas radiales alrededor de la zona triturada. Mientras más grande es la intensidad de la onda de choque, más grandes son las grietas y mayor es su número. Detrás de la zona de grietas se forman también grietas aleatorias importantes. Si la roca presenta fracturas naturales intersectadas longitudinalmente, no se generan grietas radiales, sino que estas se abrirán.

### **4. Reflexión de la onda de choque**

Cuando la onda de choque alcanza la cara libre, se produce una reflexión como onda de tracción y de cizallamiento. Si la tensión de tracción supera a la resistencia a la tracción de la roca, se producirá hacia el interior un fenómeno denominado descostramiento. Cabe señalar que este fenómeno no contribuye mayormente al proceso de fragmentación total.

### **5. Extensión y apertura de las grietas radiales**

Después o durante la formación de las grietas radiales, los gases comienzan a expandirse y penetrar en ellas. El número y la longitud de las grietas abiertas y desarrolladas dependen fuertemente de la presión ejercida por los gases. Los gases generan gran parte de la energía total aportada por el explosivo, por lo cual es de suma importancia evitar que los gases se escapen al exterior.

### **6. Fracturamiento por descompresión**

Después del paso de la onda de compresión se produce un estado de equilibrio cuasi-estático seguido de una caída súbita de presión en el pozo debido al escape de los gases a través del retacado, de las grietas y también al desplazamiento de la roca. La energía de tensión almacenada se libera muy rápidamente, generándose sollicitaciones de tracción y cizallamiento que provocan la rotura del macizo. Esto afecta a un gran volumen de roca en todas las direcciones y en distancia de varias decenas de metros.

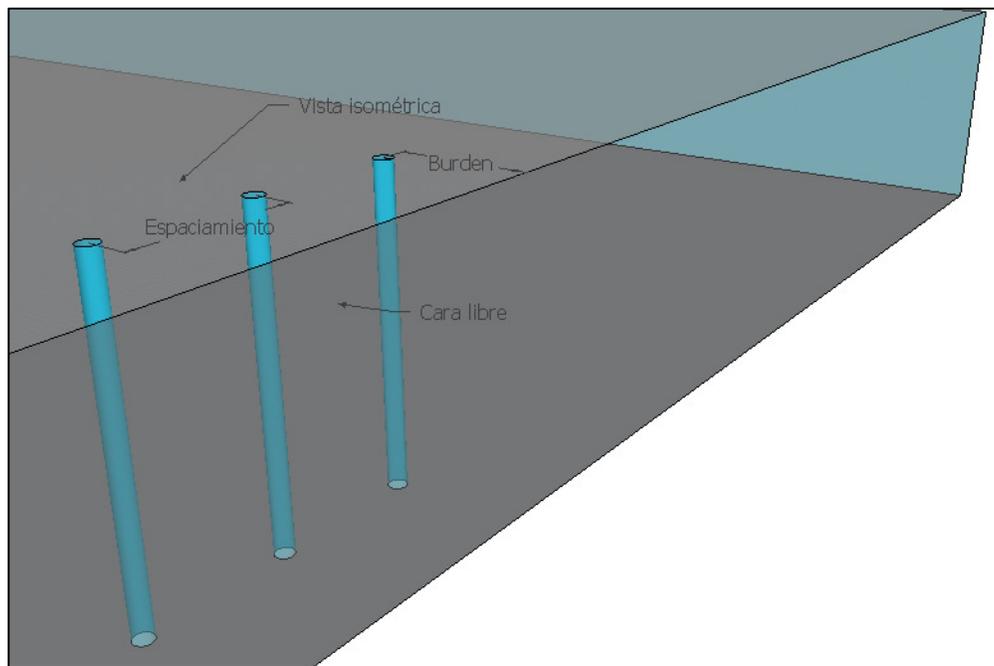
### **7. Rotura por flexión**

La presión ejercida por los gases de explosión sobre el material situado frente a la columna explosiva hace que la roca se comporte como vigas paralelas empotradas superior e inferiormente. Con ello las vigas de rocas se deforman y luego se agrietan por flexión, esto sucede durante y después de los mecanismos de agrietamiento radial y descostramiento.

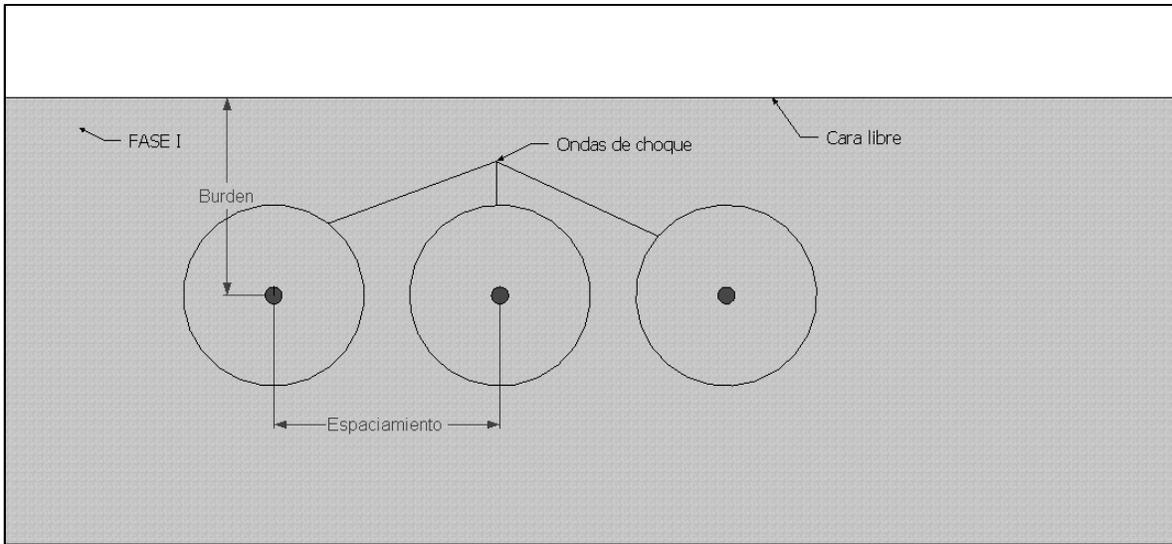
## 8. Rotura por colisión

La roca quebrada colisiona entre sí y con el suelo, con ello se produce una conminución extra, que se ha puesto en manifiesto en estudios con fotografías ultrarrápidas (Hino, 1959; Petkof, 1961).

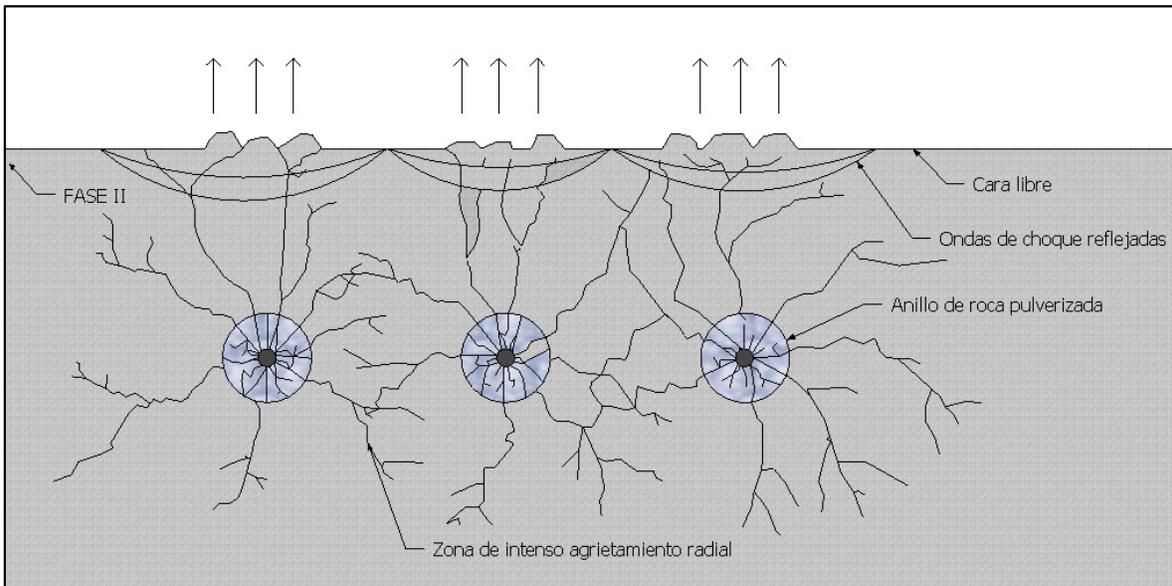
En las siguientes figuras se muestra un resumen de los mecanismos de fragmentación del macizo rocoso en 4 pasos. En primer lugar se observa la figura 28, en la que se puede apreciar la vista isométrica, donde los parámetros de entrada de la perforación son el Burden y el Espaciamiento.



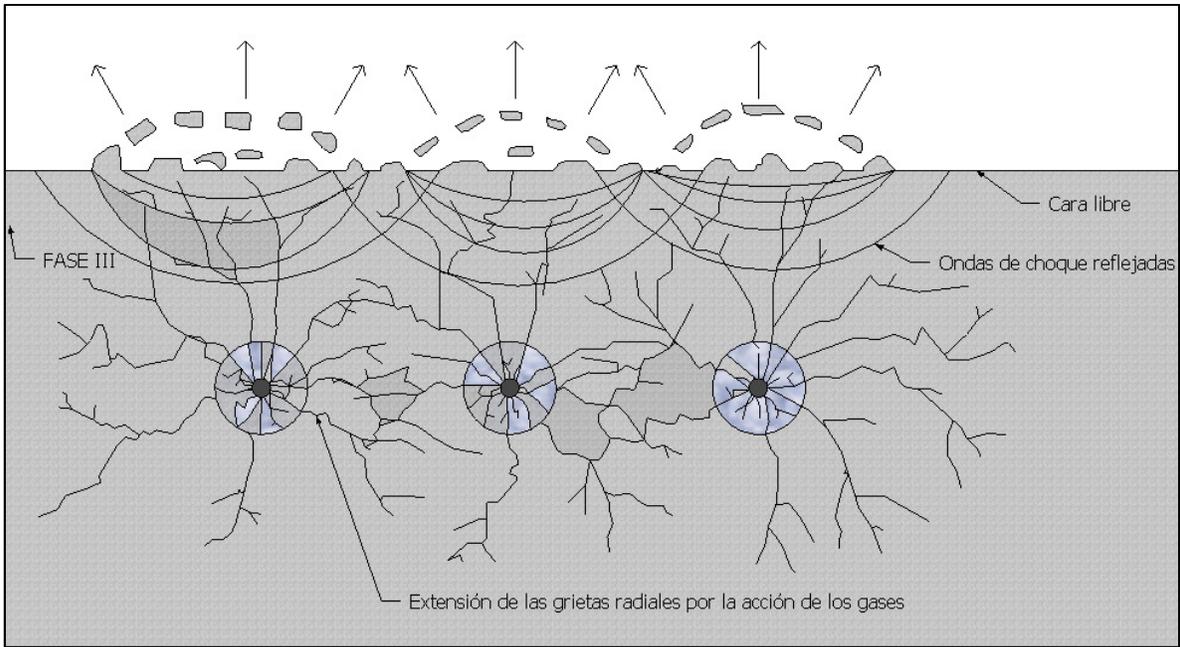
**Figura 28: Vista isométrica de los parámetros de entrada en la perforación**



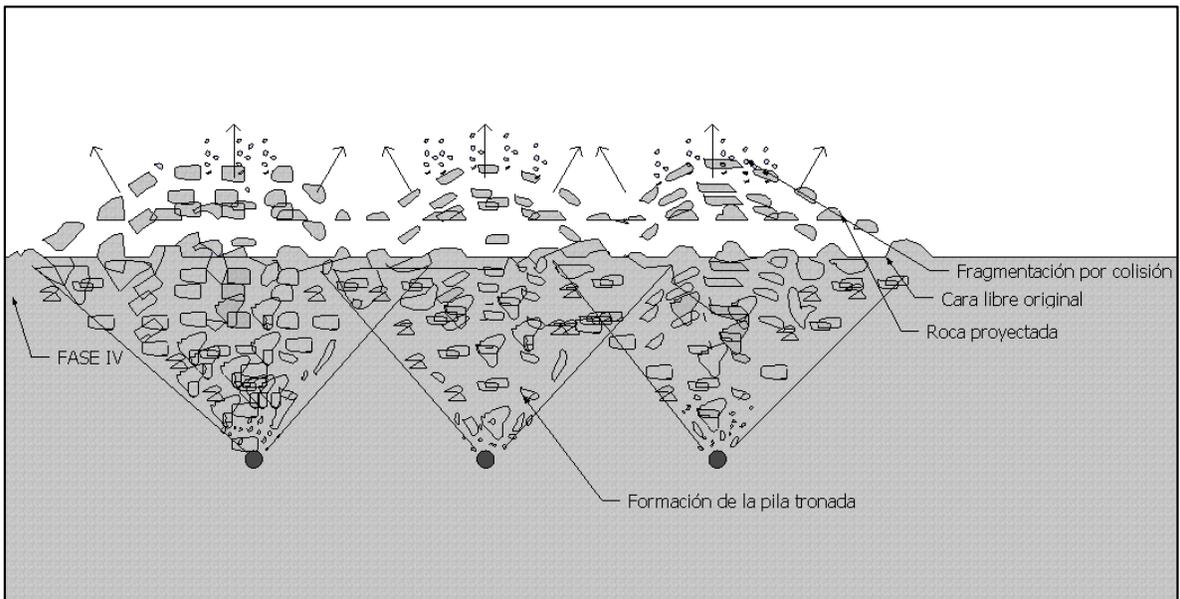
**Figura 29: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase I**



**Figura 30: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase II**



**Figura 31: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase III**



**Figura 32: Vista en planta de la secuencia de los mecanismos de fragmentación, Fase IV**

## CAPÍTULO 4: DESARROLLO DEL ESTUDIO

Un objetivo importante de este estudio es validar las mallas de perforación que se están usando actualmente en la mina; para ello hay que evaluar su comportamiento, que se refleja directamente en los resultados de la tronadura. Los resultados de la tronadura se miden mediante un análisis granulométrico del producto, como también por el rendimiento en el carguío y el análisis de los resultados en planta. Para definir qué variables son las más influyentes dentro del proceso de tronadura, se procede primero a recopilar los antecedentes: geológicos y geomecánicos, de diseño de perforación y tronadura y también los propios de la operación minera.

Con los antecedentes y los registros de los resultados de la tronadura, se creó una base de datos con todas las variables que influyen de una u otra manera en el proceso. Para obtener las variables relevantes se procede a estudiar su influencia en los resultados granulométricos, por lo cual se realizó un análisis estadístico univariable y multivariable.

Con las variables relevantes se crearon modelos predictivos granulométricos y operacionales que sustentan la base para proponer alternativas de mejora al diseño de la perforación y tronadura. En el siguiente diagrama se muestra la metodología de trabajo utilizada en el presente estudio.

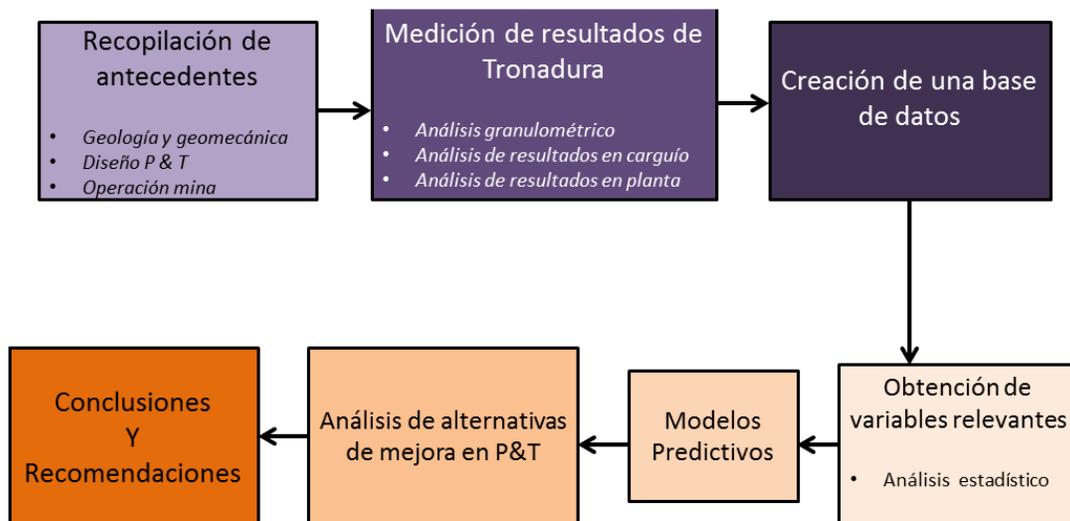


Figura 33: Diagrama del desarrollo del estudio

## 4.1 Recopilación de antecedentes

En relación al estudio, se recopilaron los antecedentes necesarios de 13 disparos, escogidos de tal manera de abarcar todo el espectro de valores de cada variable. Por ejemplo, para la variable litología se tomaron disparos que contuviesen Toba Brechosa, Andesita, Traquita y Veta Negra, que son las 4 litologías dominantes presentes actualmente en la mina.

A continuación se presentan las variables recopiladas categorizadas en 4 grupos.

### Geología

- Litologías

### Geomecánica

- Estructuras

### Perforación

- Malla de perforación
- Diámetro de perforación
- Estados de pozos y terreno

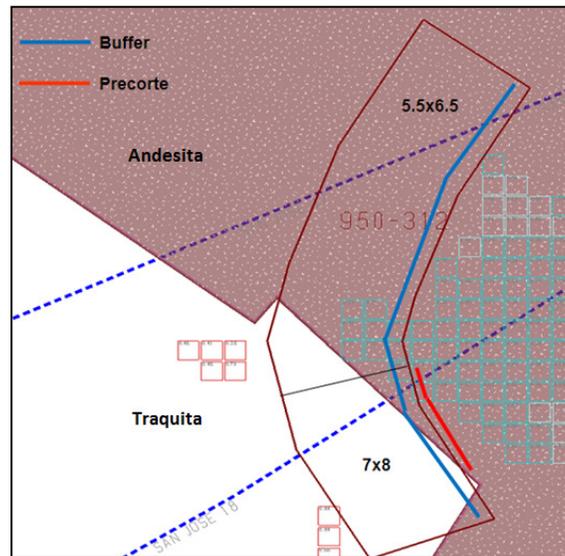
### Tronadura

- Explosivo
- Factor de carga
- Tiempos de retardo
- Secuencia de salida
- Taco

A modo de ejemplo se muestra lo ocurrido en el disparo 950-312. En la figura 34 se observa que el disparo (polígono) se encuentra ubicado en Traquita (color blanco) y en Andesita (color café), esto según el modelo geológico. Adicionalmente, se observan 2 estructuras mayores cortando al disparo con un cierto ángulo con respecto a la secuencia de salida. Las estructuras están representadas por la línea azul punteada, también es posible apreciar una corrida simple de buffer en color azul y un tramo con precorte en color rojo. Cabe señalar que el precorte sólo tiene sentido en roca sana, ya que en sectores de caving la roca se encuentra fracturada y no vale la pena cuidar la caja.

Con respecto a la malla de perforación, además de las mallas indicadas previamente, se están probando nuevas alternativas. Para el caso de la zona de caving la configuración de la malla original es de 6x7 [mxm], en este disparo se están usando mallas de 5,5x6,5 [mxm]; para el caso de roca sana en este disparo se usó una malla de 6x7 [mxm] y no de 7x8 [mxm] como lo indica el

dominio respectivo de perforación y tronadura. El diámetro de perforación utilizado es de 10 5/8" para tiros de la producción y para algunas configuraciones de buffer, y de 6 1/2" para el caso del precorte y para otras configuraciones del buffer.

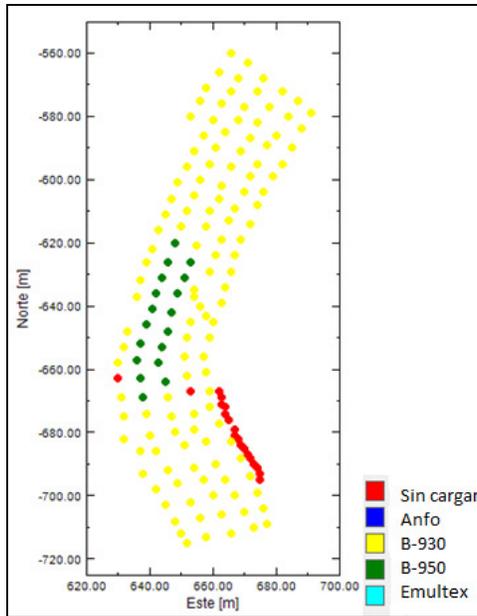


**Figura 34: Variables del disparo 950-312**

Cabe señalar que la malla de perforación teórica es distinta a la malla de perforación diseñada, que a su vez difiere de la malla que se perfora realmente, debido principalmente al marcado de los pozos por parte de topografía y al error implícito que conlleva la perforación. En la figura 35 se muestra la malla final perforada del disparo 950-312 tomado como ejemplo, donde cada pozo se encuentra con sus coordenadas geográficas. También es posible apreciar el tipo de explosivo utilizado en cada pozo. En color rojo se muestran los pozos sin cargar o en precorte, en azul los pozos cargados con Anfo, en amarillo los pozos cargados con Blendex-930, en verde los pozos cargados con Blendex-950 y en celeste los pozos cargados con Emultex (este disparo se encuentra cargado sólo con Blendex-930 y Blendex-950).

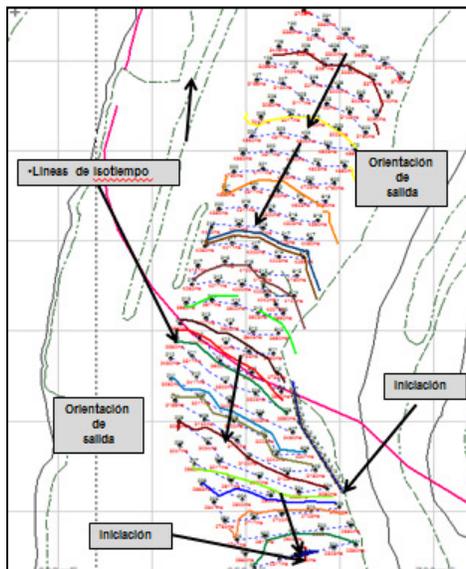
Se lleva además el registro de los pozos dañados o con geometría irregular y de los pozos sin cargar. En la figura 35 se observan además 2 pozos de producción sin cargar (el resto son pozos en precorte); esto se debe a la inestabilidad del terreno; lo que hace que los pozos se desmoronen impidiendo de esta forma el carguío del explosivo; no obstante, algunos pozos dañados se cargan de igual forma. También se aprecia en la parte media del disparo la presencia de humedad, debido a ello que se cargan los pozos con Blendex-950.

Con la información del tipo de explosivo, la cantidad usada por pozo y la malla, es posible calcular el factor de carga total y el factor de carga por pozo.



**Figura 35: Malla y explosivo en el disparo 950-312**

En la figura 36 se observan las líneas de isotiempo y la orientación de salida del disparo, también se cuenta con la información del tiempo de retardo entre filas y entre pozos. La orientación de salida es una variable que se estudia en función de la dirección de las estructuras. Este proceso de recopilación de datos se realizó para los 13 disparos.



**Figura 36: Secuencia de salida en el disparo 950-312**

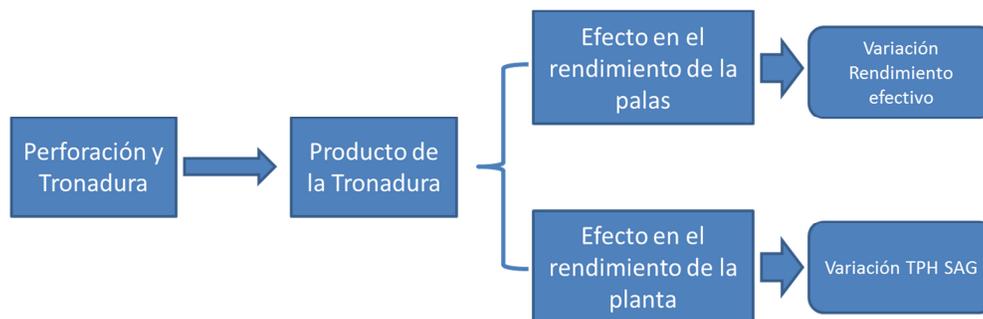
A continuación se incluye una tabla que contiene el resumen de la litología y la malla para todos los disparos estudiados. La litología se obtuvo de los planos geológicos de muestreo diarios, complementada con el modelo geológico para los sectores sin información.

**Tabla 2: Litologías y mallas por disparo**

Disparo	Litología	Malla [mxm]
1265-712	Veta Negra	6X7-7X8
965-311	Andesita-Traquita	6x7
935-302	Traquita	5x5
935-304	Andesita-Traquita	5x5
965-320	Andesita	7x8
950-311	Andesita	7x8-6x7
950-312	Andesita-Toba Brechosa	6x7-5,5x6,5
965-321	Andesita-Traquita	7x8-5,5x6,5
1265-713	Veta Negra	7x8
935-308	Toba Brechosa	6x7
920-301	Andesita	5,5X6,5
920-302	Andesita	5,5X6,5
935-309	Toba Brechosa	6x7

## 4.2 Medición de resultados de la perforación y tronadura

El resultado de la perforación y tronadura se evaluó en base a la granulometría del material quebrado producto del proceso; pero, además, en función de los efectos producidos en los procesos aguas abajo. Específicamente, se estudió el efecto producido en el rendimiento de las palas, como asimismo el efecto producido en el rendimiento de la planta. En la figura 37 se muestra el diagrama correspondiente.



**Figura 37: Diagrama de la medición de resultados en perforación y tronadura**

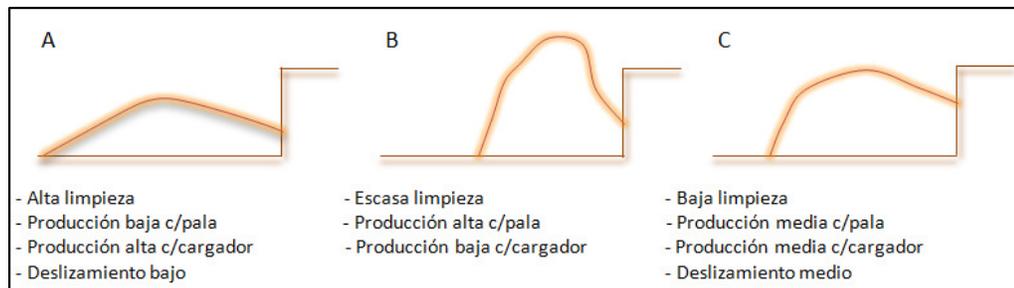
#### 4.2.1 Granulometría del producto de la tronadura

El producto de la tronadura se evaluó mediante los siguientes criterios:

##### a) Geometría de la pila generada

Luego de efectuada la tronadura se midió in-situ la geometría de la pila correspondiente a cada disparo, categorizándola dentro de alguna de las 3 geometrías mostradas en la figura 38.

En todos los disparos de la Fase 2 la geometría observada es del tipo B, mientras que los disparos de la Fase 3 corresponden a la geometría C. La geometría B se prefiere para obtener una alta producción de las palas, pero afecta el rendimiento de los cargadores; mientras la geometría C está recomienda para obtener una producción media, tanto para palas como para cargadores.



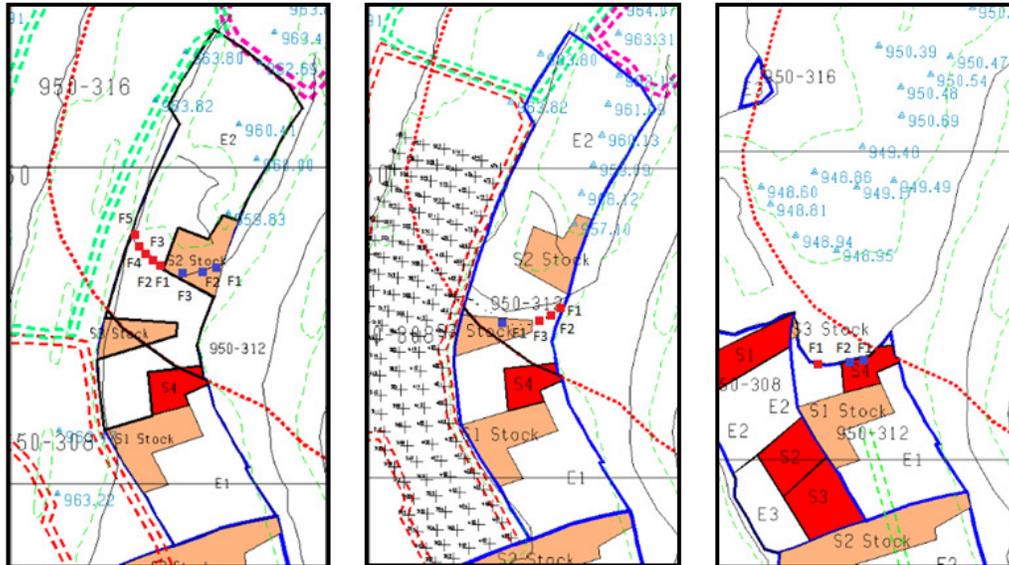
*Figura 38: Geometrías de la pila tronada*

##### b) Granulometría de la pila tronada

La granulometría es un buen estimador relativo para cuantificar la calidad de la tronadura. La granulometría se midió mediante foto-planimetría, donde las imágenes obtenidas de la frente expuesta fueron analizadas mediante el software Split, el cual arroja como resultado una curva granulométrica que categoriza todo el espectro de tamaños de la pila. Mediante la curva granulométrica fue posible obtener el D80, que representa el tamaño bajo el cual se encuentran el 80% de la muestra estudiada. En la figura 39 se muestra el ciclo completo para la cuantificación de la granulometría de la pila tronada.

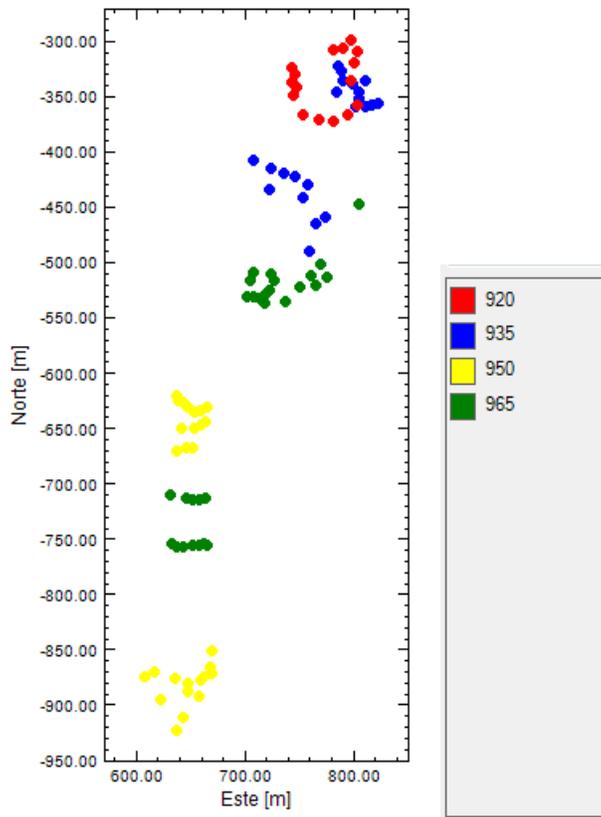


tomadas en mineral (stock o mineral) y los cuadros de color rojo representan las fotografías tomadas en estéril.



**Figura 40: Secuencia en la toma de fotografías disparo 950-312**

En la siguiente figura se muestra gráficamente el número de fotografías ordenadas por banco en la Fase 2; donde en color rojo se identifican las fotografías del banco 920, en azul las fotografías del banco 935, en amarillo las fotografías del banco 950 y en verde las fotografías del banco 965.



**Figura 41: Distribución de fotografías por banco**

En la siguiente tabla se indica la cantidad de fotos tomadas en mineral y en estéril para cada disparo. El número de fotografías por frente expuesta depende del tamaño de la frente, mientras mayor sea su área, más fotografías se deben tomar para asegurar un buen muestreo. Por otro lado el número total de fotografías del disparo depende de su tonelaje.

**Tabla 3: Número de fotografías por disparo**

<b>Disparo</b>	<b>Fotos mineral</b>	<b>Fotos estéril</b>	<b>Total</b>
1265-712	0	15	15
965-311	9	3	12
935-302	2	2	4
935-304	8	0	8
965-320	6	4	10
950-311	9	5	14
950-312	6	9	15
965-321	3	4	7
1265-713	0	3	3
935-308	5	2	7
920-301	4	2	6
920-302	2	8	10
935-309	2	1	3
<b>total</b>	<b>56</b>	<b>58</b>	<b>114</b>

## **2) Análisis mediante Split**

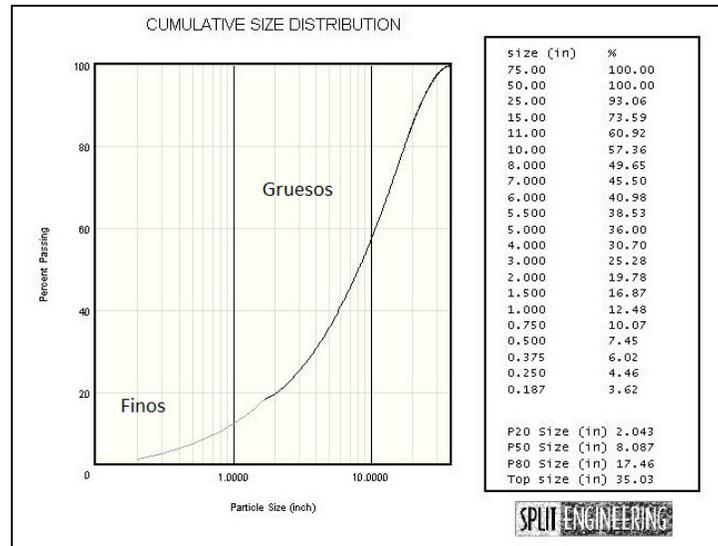
El software Split permite obtener el resultado de la fragmentación mediante el análisis de imágenes. En la mina se encuentra disponible el software en su versión simple, donde las fotografías se obtienen en terreno y luego se procesan en un computador, y también en versión online, donde las imágenes son captadas y procesadas a intervalos de tiempo en la salida del chancador, mediante una cámara ubicada en las correas de alimentación al stockpile, antes de entrar al molino SAG. Si bien el software aún presenta varias deficiencias, como por ejemplo la poca representatividad en la cuantificación de los finos, todavía es considerado como una de las herramientas más confiables para la estimación granulométrica.

El software permite analizar imágenes individuales y también un conjunto de imágenes. Esto permite obtener resultados por fotografía, por mineral o estéril, por frente expuesta y por el disparo completo. En El Soldado y otras faenas se ha corroborado que Split entrega curvas granulométricas similares a las del software Wipfrag, donde el error relativo entre ambos, en todo el espectro de tamaños, es menor al 5%.

## **3) Curva granulométrica**

La curva granulométrica obtenida se divide entre el sector de “gruesos”, que representa a todos los tamaños que fue posible delimitar manualmente, y el sector de “finos”, que es el sector estimado. Es importante entonces tratar de delimitar el mayor porcentaje de trozos de roca, y asegurar así una mayor precisión de la curva, para lo cual se debe usar el zoom del programa.

El sector de “finos” se estima mediante la curva que mejor se ajuste a la curva de “gruesos”, para ello el programa elige entre la distribución de Rosin-Rammler y la distribución de Gaudin-Schuhmann, mediante la minimización del error cuadrático. En la figura 42 se observa el sector de “gruesos” en color oscuro y el sector de “finos” en color claro. A la derecha se incluye la tabla donde se muestra el tamaño del fragmento en pulgadas y su respectivo porcentaje pasante. Split además entrega el D20, D50, D80 y el D100; en este estudio se trabajó en base al D80.

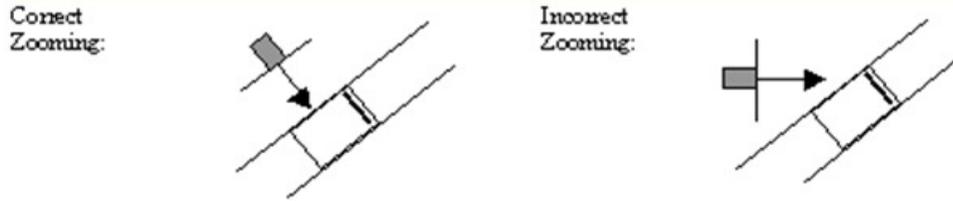


**Figura 42: Curva granulométrica entregada por Split**

#### 4.2.2 Protocolo para la toma y análisis de fotografías

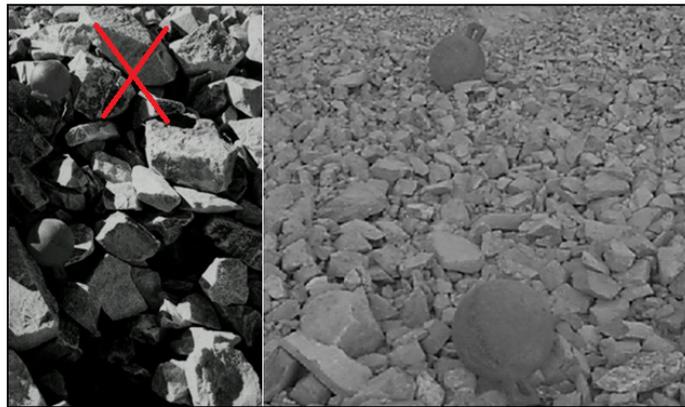
La toma y el análisis de las fotografías representa el primer paso en la cuantificación de los resultados para el estudio del proceso “mine to mil”. Una mala estimación en esta primera etapa afecta los resultados y las conclusiones del proyecto, es por ello que se recomienda lo siguiente:

- Tomar imágenes sin distorsión, para ello se debe enfocar de manera adecuada y no moverse durante la toma de la fotografía.
- Distribuir espacialmente de manera correcta los elementos de escalamiento; es decir, el cuadro se debe ubicar de tal manera que su base quede paralela al piso (horizonte).
- Tomar las fotografías perpendicularmente a la pendiente. En la siguiente figura se observa la manera correcta y la manera errónea de obtener las imágenes.



**Figura 43: Ángulo correcto para tomar las fotografías**

- La iluminación es importante, se debe tener cuidado con las sombras. En la siguiente figura se muestra la forma ideal de luminosidad y la forma equivocada de obtener las imágenes.



**Figura 44: Comparación de fotografías con diferente luminosidad**

- Las imágenes deben contener todos los tamaños, para lo cual se recomienda sacar una fotografía panorámica y varias fotografías con un acercamiento medio, como se muestra en la figura 45, con ello se asegura que cada foto represente un área estándar definida.
- Debido a que las fotografías se obtienen solamente de la parte inferior de la frente expuesta, ya que su altura es de aproximadamente 15 metros y el riesgo de derrumbe es elevado, el rango de tamaños de toda la frente expuesta no se cuantifica de buena manera. Para representar el espectro completo de tamaños se puede usar la fotografía panorámica y obtener así ponderadores que permitan estimar tanto el fino como el grueso. Particularmente en este caso se optó por otro camino, mediante un estudio de segregación por tamaños en el acopio y en una frente estable de la mina y analizando varias fotografías, se obtuvo el D80 a diferentes alturas, lo que llevó a estimar un ponderador de segregación. No se recomienda sacar fotografías con diferentes acercamientos, debido a que cada una lleva implícito un ponderador diferente.



**Figura 45: Fotografía con acercamiento medio**

- Las fotografías deben representar el mayor porcentaje posible de la pila, para ello se sacan las fotografías una al lado de la otra, teniendo cuidado con el traslape de las imágenes.
- Para el análisis de las fotografías mediante Split se recomienda no usar el delineador automático. Si la granulometría es homogénea, con luminosidad óptima y la presencia de finos es mínima, se puede realizar la delimitación automática, retocando manualmente los detalles; pero, en la mayoría de los casos, el material no presenta tales características. El procedimiento automático puede ahorrar bastante tiempo por fotografía. Concretamente, el procedimiento manual requiere alrededor de 1 hora versus 5 minutos del procedimiento automático; pero los resultados de este último presentan una variabilidad y una sensibilidad altísima, por lo que se recomienda utilizar este procedimiento sólo para estimaciones a priori y por ningún motivo como sustento de un estudio.
- Se recomienda revisar, mediante el uso del zoom que cada uno de los trozos de roca quede bien delineado, ya que el resultado puede variar bastante si no se considera este detalle. El software podría no considerar continuos algunos trazos, en la figura 46 se observa el trazo discontinuo de la izquierda mientras que el de la derecha es continuo.



**Figura 46: Comparación de la continuidad de trazos en Split**

### **4.3 Análisis de resultados de la tronadura**

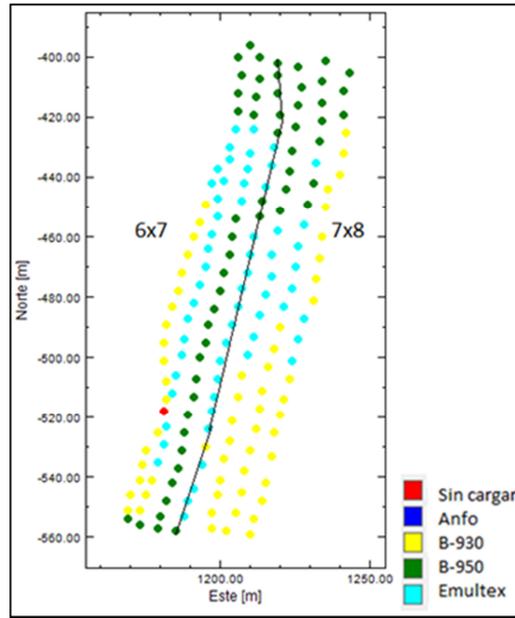
Para evaluar si la tronadura es buena o no hay que usar criterios, algunos un tanto subjetivos (por ejemplo inspeccionar visualmente la pila tronada), otros más técnicos (por ejemplo usar programas computacionales de medición granulométrica). En este estudio se trató de ser lo más certero posible respecto a la cuantificación y al análisis de los resultados de la tronadura. En este sentido se realizó un análisis del producto de la tronadura y sus efectos en los procesos posteriores.

#### **4.3.1 Análisis de resultados del producto de la tronadura**

Como se indicó anteriormente, el producto de la tronadura se puede cuantificar por medio de la geometría y granulometría de la pila. En el capítulo anterior se describieron los 3 tipos de geometría de la pila tronada, y se consignó que los disparos de la Fase 2 presentaron una geometría tipo B y los disparos de la Fase 3 presentaron una geometría tipo C, por lo cual el análisis en esta parte se centrará solamente en el estudio de la granulometría de la pila de material tronado.

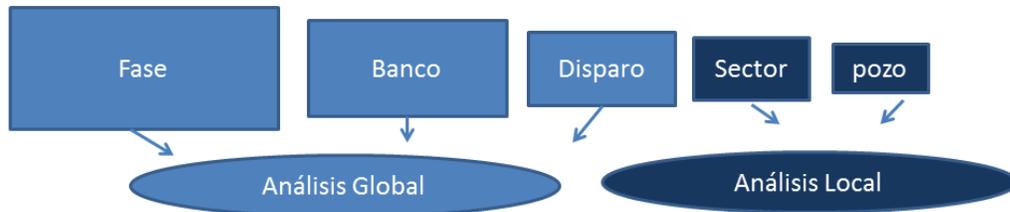
Hay que precisar que las variables que influyen en los resultados de la tronadura no se encuentran distribuidas de manera homogénea dentro de un área a estudiar. Por ejemplo, en un disparo pueden coexistir 2 tipos de mallas de perforación o 3 tipos diferentes de explosivos, por lo que el análisis debe realizarse por sector y no tomando el promedio del disparo completo.

En la figura 47 se observa el disparo 1265-712, donde a la izquierda existe una malla de 6x7 [mxm] y a la derecha una de 7x8 [mxm]; además existen pozos cargados con Blendex-930, Blendex-950 y con Emultex. Si se realiza un análisis conjunto se obtendrá un resultado granulométrico promedio del disparo, asociado a variables promedios; por ejemplo, asociado a una malla promedio y a un factor de carga promedio en una litología promedio. Con este análisis no se podrán sacar conclusiones acertadas sobre la influencia de las variables en la tronadura. Por lo anterior se propone estudiar los resultados en diferentes escalas.



**Figura 47: Configuración de la malla, disparo 1265-712**

Lo que se realizó en este trabajo fue cuantificar los resultados granulométricos y las variables a pequeña y a gran escala; es decir, se realizó un estudio por pozo, por sector, por disparo, por banco y por fase (figura 48). Como se dispone de las coordenadas de cada fotografía y de las variables asociadas a la perforación y tronadura, se puede efectivamente encontrar relaciones acertadas entre el D80 en la escala correspondiente y cada una de las variables.

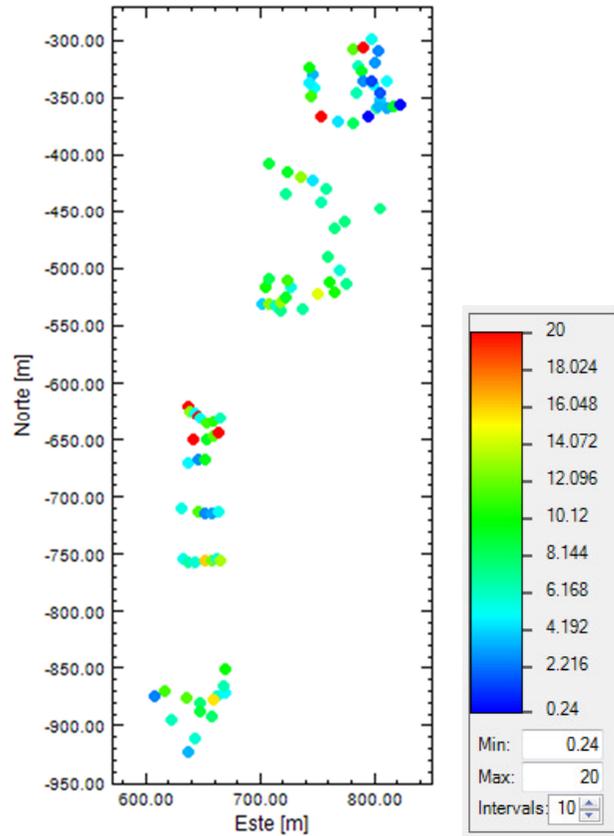


**Figura 48: Diagrama del análisis por escala**

Se estudiaron 2 fases, 5 bancos y 13 disparos. Existen sectores de mineral, de estéril, sectores por cada malla estudiada, sectores por litología, sectores de cavidades, sectores entre las cavidades o pilares, sectores de roca sana y sectores de borde. Se obtuvo la granulometría asociada a cada sector.

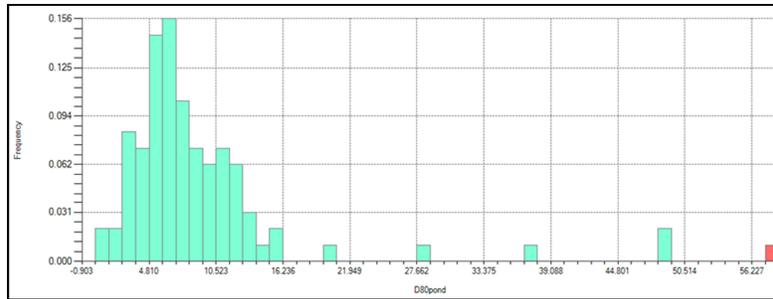
En la figura 49 se muestran los resultados granulométricos de todas las fotografías de la Fase 2, desplegadas en el plano con coordenadas Este [m], Norte [m]. En la escala de colores, el azul

representa un D80 menor a 2 [Pulg], mientras que en color rojo se encuentran los datos con un D80 mayor a 18 [Pulg].



**Figura 49: Distribución del D80 por fotografía en fase 2**

En la figura 50 se muestra el histograma referido a todas las fotografías tomadas, y en la tabla 4 se muestran los valores estadísticos básicos asociados. En el histograma se puede observar una distribución relativamente Gaussiana, donde existen valores a la derecha que se escapan de esta lógica. Más adelante se irán dando a conocer las causas de los resultados alejados de la media (7,8 Pulgadas).



**Figura 50: Histograma global D80**

**Tabla 4: Estadísticas básicas D80**

<b>Mínimo</b>	0,24
<b>Máximo</b>	57,37
<b>Varianza</b>	84,3
<b>Cuantiles</b>	
<b>0,025</b>	1,51
<b>0,25</b>	5,22
<b>0,5</b>	7,11
<b>0,75</b>	10,77
<b>0,975</b>	49,25

#### **a) Análisis por fase**

El diseño de la perforación y tronadura en la Fase 3 está basado en los requerimientos de las palas y no en los requerimientos de planta, ya que en esta fase sólo existe estéril. Es por ello que se usan mallas más grandes, con lo cual el D80 promedio es mayor que en Fase 2, como muestra el siguiente gráfico.

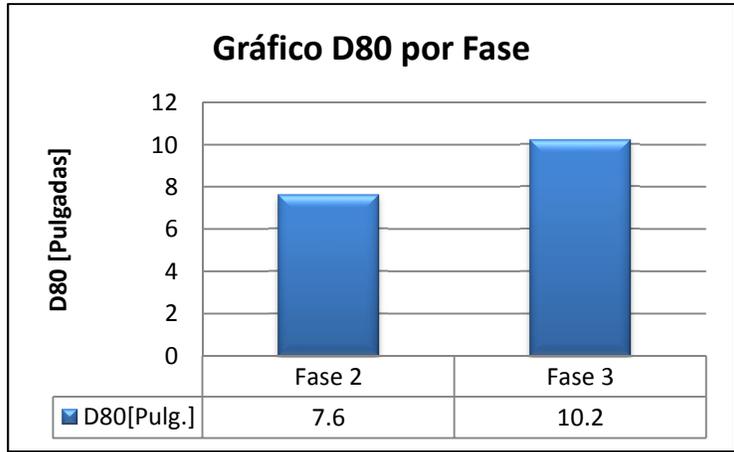


Figura 51: Gráfico D80 por fase

**b) Análisis por banco**

Para los efectos de este estudio se realizaron una serie de tronaduras con diferentes combinaciones malla-explosivo, principalmente para hacer frente a los sobretamaños obtenidos, lo que incidió directamente en el resultado granulométrico. A continuación se muestra un gráfico donde se puede observar que el banco 950 presenta el mayor D80, en contraste con los bancos 935 y 920 que presentan una granulometría más fina.

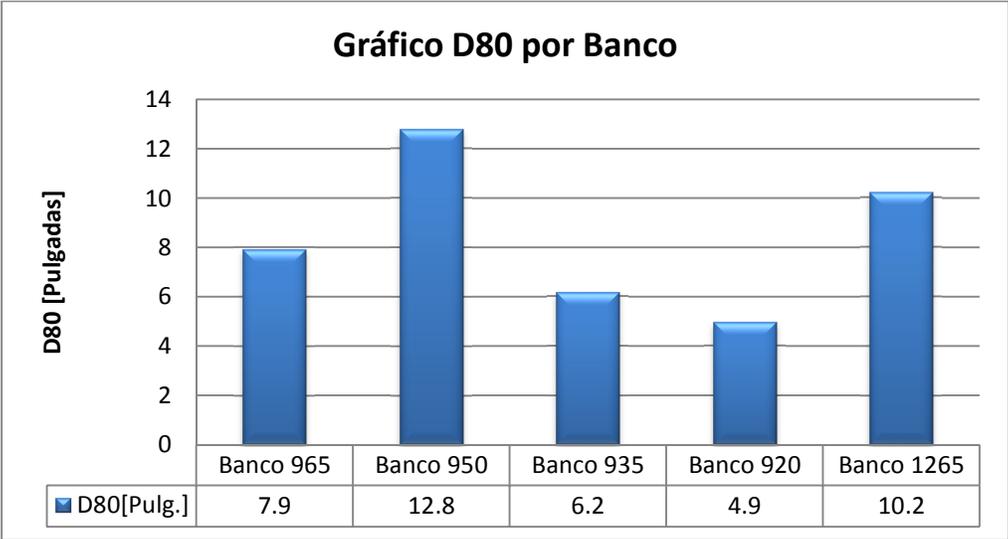


Figura 52: Gráfico D80 por banco

### **c) Análisis por disparo**

En la siguiente tabla se muestra el D80 en mineral y en estéril, además se observa el D80 global del disparo. El disparo 950-312 presenta el D80 más elevado, resultado que se debe a la conjugación de varios factores, entre ellos un factor de carga bajo en una zona de cavidades, asociado a una litología complicada.

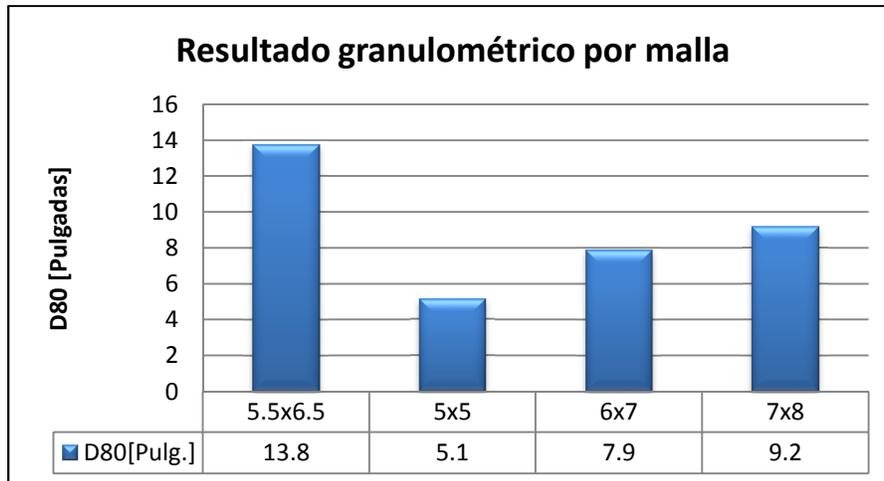
**Tabla 5: D80 en estéril y mineral para cada disparo**

<b>Disparo</b>	<b>Estéril [Pulg]</b>	<b>Mineral [Pulg]</b>	<b>Total [Pulg]</b>
1265-712	9,3		<b>9,3</b>
965-311	5,7	7,5	<b>6,6</b>
935-302	6,4	4,7	<b>5,2</b>
935-304		4,0	<b>4,0</b>
965-320	8,7	9,1	<b>8,9</b>
950-311	5,1	8,3	<b>7,6</b>
950-312	26,9	11,0	<b>18,0</b>
965-321	9,4	7,3	<b>8,2</b>
1265-713	11,1		<b>11,1</b>
935-308	8,7	6,6	<b>7,9</b>
920-301	10,9	3,7	<b>4,3</b>
920-302	5,5	5,6	<b>5,6</b>
935-309	7,5	7,6	<b>7,6</b>

### **d) Análisis por sector**

Como se dijo anteriormente se dividió cada disparo en varios sectores, para poder así sacar conclusiones más certeras.

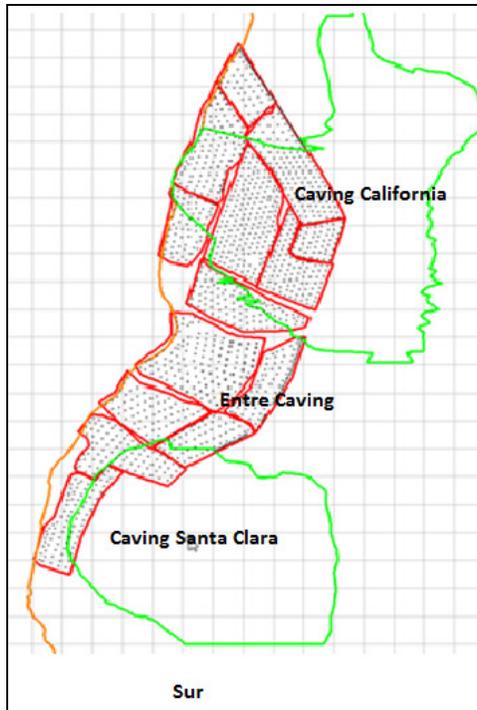
A continuación se muestra el gráfico del D80 por malla, donde la malla que presenta el D80 menor es la de 5x5 [mxm]. Por otro lado, la malla de 5,5 x 6,5 [mxm] presenta los resultados granulométricos mayores y las mallas de 6x7 [mxm] y de 7x8 [mxm] presentan resultados similares.



*Figura 53: Gráfico D80 por sector*

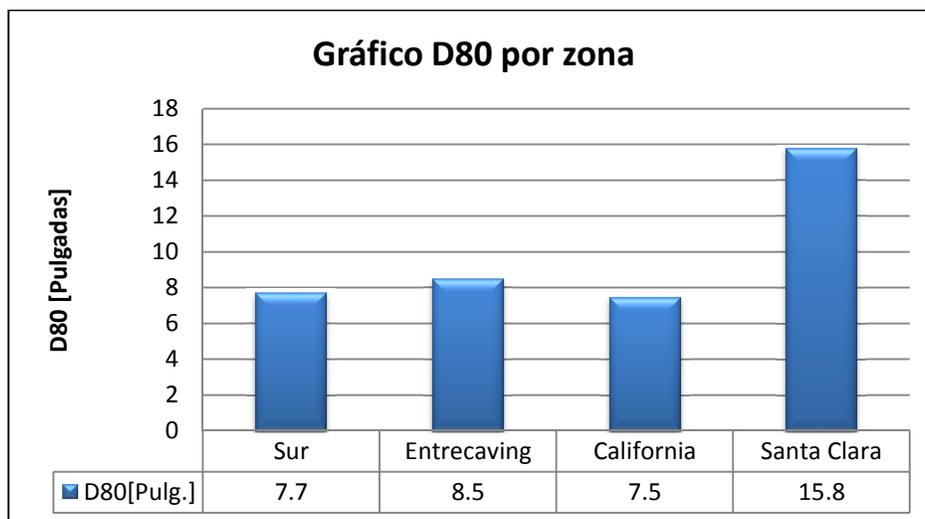
La mina presenta varias zonas bien definidas que tienen características geomecánicas particulares. En la Fase 3 solamente existe roca sana y la litología Veta negra; el problema se encuentra en la Fase 2, donde conviven las litologías Traquita, Andesita y Toba Brechosa en los sectores de roca sana y de caving. Debido a lo anterior se realizó una división de la fase 2 y se analizaron los resultados por zona (ver figura 54). Las zonas estudiadas son las siguientes:

- Caving California
- Entre caving o pilar
- Caving Santa Clara
- Zona sur



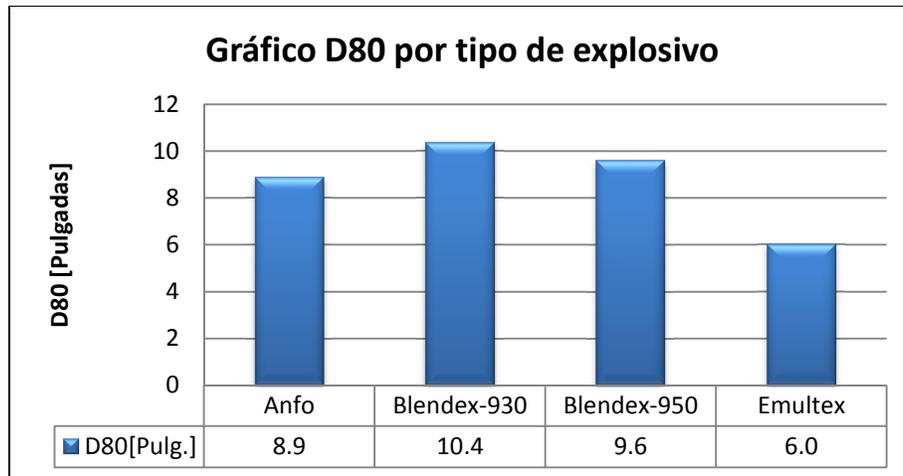
**Figura 54: Zonas de Fase 2**

Se observa del siguiente gráfico que el sector de Santa Clara presenta el mayor D80, que es la zona donde aparece la litología Toba Brechosa. Esta litología no estaba cuantificada en el modelo geológico del banco 950 y 935, por lo que sólo una vez tronado el disparo 950-312 se comprobó la presencia de ella en el sector.



**Figura 55: Gráfico D80 por zona**

En el siguiente gráfico se observa que con el uso del Emultex se obtienen los más bajos resultados granulométricos. El Anfo, el Blendex-930 y el Blendex-950 presentan resultados granulométricos similares.

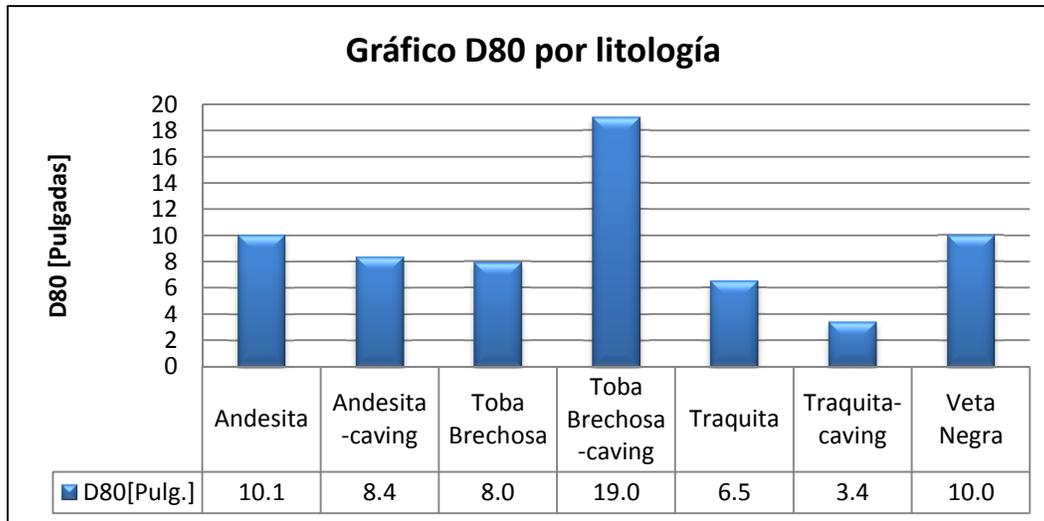


*Figura 56: Gráfico D80 por tipo de explosivo*

Para poder cuantificar el efecto de la litología en el resultado granulométrico, hay que diferenciar entre la que se encuentra en roca sana y la que se encuentra en zona de caving. Así, las litologías estudiadas son:

- Andesita
- Andesita en caving
- Toba Brechosa
- Toba Brechosa en caving
- Traquita
- Traquita en caving
- Veta Negra

Como era de esperar el mayor resultado en términos granulométricos, se obtiene en la litología Toba Brechosa ubicada en caving; en cambio esta litología, en roca sana, se encuentra cercana al promedio. Esto hace pensar que la zona de caving juega un rol preponderante en la fragmentación de la roca; pero si se observa bien el gráfico siguiente, se tiene que tanto la Andesita como la Traquita en caving presentan un D80 menor que el de la roca sana. Con ello se puede intuir que existe una variable que tiene una mayor relevancia que la zona en el proceso de perforación y tronadura.



**Figura 57: Gráfico D80 por litología**

Del análisis de los resultados anteriores, plasmado en los distintos gráficos, surgen algunas interrogantes. Por ejemplo, ¿por qué el D80 de la malla 7x8 [mxm] es menor al D80 de la malla de 5,5x6,5 [mxm], siendo que en esta última malla se debe perforar mucho más?; la respuesta no es simple, tiene que ver principalmente con las variables relevantes que tienen una mayor incidencia en el proceso de perforación y tronadura. En el caso de la malla de 5,5x6,5 [mxm], si bien la malla es pequeña, la menor densidad del explosivo usado hace que el factor de carga sea insuficiente para fragmentar de buena manera. Si a eso le sumamos la ubicación en caving y la presencia de una litología complicada en términos geomecánicos (Toba Brechosa), debido a su mayor competencia y a su módulo elasticidad, se obtiene un resultado pobre en términos de fragmentación.

Lo explicado anteriormente se pueda visualizar mejor en un gráfico en 3D, donde se observa que en los ejes que conforman el plano horizontal se muestra la malla y el tipo de explosivo, y en el eje ortogonal a dicho plano se cuantifica el resultado granulométrico representado por el D80 (ver figura 58).

Cabe señalar que en la malla de 7x8 [mxm] con Anfo se utilizaron mangas plásticas para recubrir el manto cilíndrico que forma el pozo, lo cual podría explicar la obtención de un D80 menor a lo esperado.

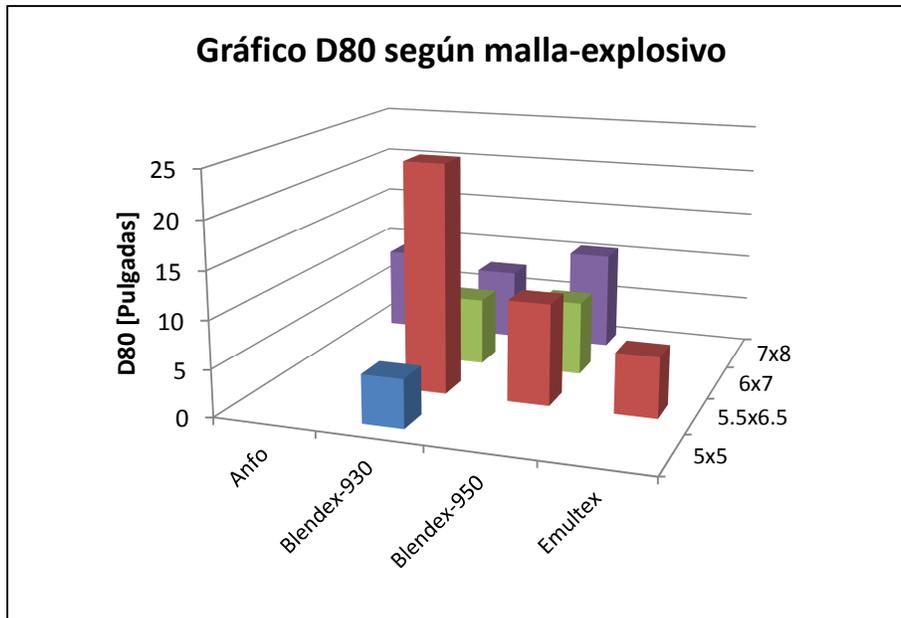


Figura 58: Gráfico 3D, malla-explosivo vs D80

#### 4.3.2 Análisis de resultados en el rendimiento de las palas

Lo primero que hay que preguntarse es si realmente la granulometría afecta el rendimiento efectivo de las palas. Para responder a esta interrogante primero hay que tener presente las variables que afectan al rendimiento de las palas, siendo las más importantes las que se indican a continuación:

##### a) *Habilidad del operador*

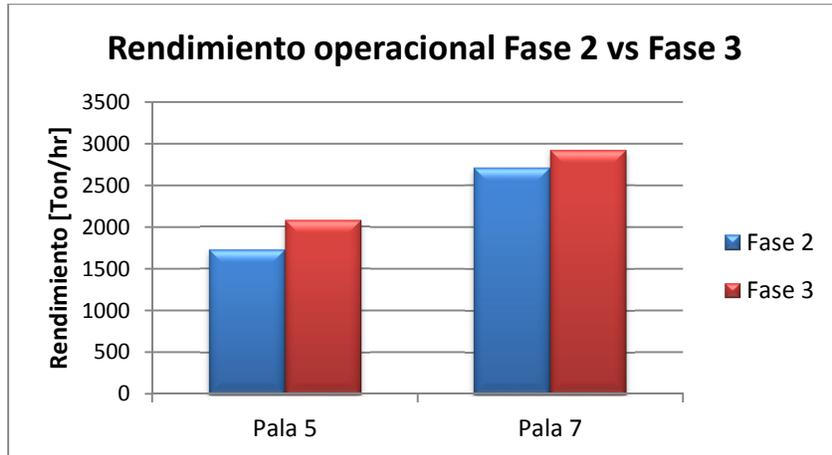
En El Soldado los operadores de las palas tienen una gran experiencia entregada por los años; todos pertenecen al tramo 7, la más alta categoría, es por ello y para simplificar el análisis que esta variable se descarta.

##### b) *Geometría de la pila de material tronado*

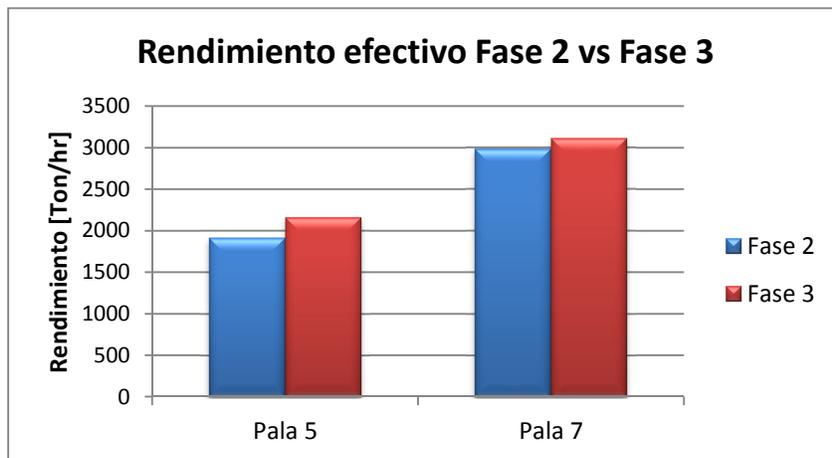
La geometría de la pila influye en el rendimiento de las palas; hay geometrías especiales para maximizar el rendimiento de las palas y otras para maximizar el rendimiento de los cargadores. En este trabajo sólo se consideró el rendimiento de las palas, ya que los cargadores en la mayoría de las ocasiones actúan como equipos de apoyo. La geometría en la Fase 2 corresponde a la tipo B y la geometría en Fase 3 es la del tipo C. Así el rendimiento efectivo de las palas queda condicionado por la fase.

Sólo las Pala 5 y 7 trabajan en ambas fases, y los resultados en cuanto a su rendimiento indican que en la Fase 3 se obtienen mayores rendimientos que en la Fase 2, aun cuando en la Fase 2 se tiene una granulometría más fina y mejores condiciones geométricas de la pila para el trabajo de las palas. Lo anterior se debe principalmente a las condiciones de operación de la Fase 2, donde existe interferencia entre los equipos debido al poco espacio de operación y a que trabajan por lo

menos 2 equipos simultáneamente extrayendo material, a diferencia de la Fase 3 donde generalmente sólo trabaja un equipo. En las figuras 59 y 60, se observa el aumento del rendimiento de la Fase 3 con respecto a la Fase 2.



*Figura 59: Comparación del rendimiento operacional por fase*



*Figura 60: Comparación del rendimiento efectivo por fase*

### **c) Tipo de pala**

La faena cuenta con 2 palas PC-5500 frontales de 37 [yd<sup>3</sup>] (Palas 2 y 3), 2 palas PC-5500 excavadoras de 37 [yd<sup>3</sup>] (Palas 5 y 6) y 1 pala PC-8000 frontal de 55 [yd<sup>3</sup>] (Pala 7). Debido a la diferencia de capacidad y forma de extraer el mineral entre las diferentes palas, resulta lógico que el rendimiento efectivo dependa del tipo de pala.

Se estudió el rendimiento por tipo de pala, separando entre las palas PC-5500 frontales, las PC-5500 excavadoras y la pala PC-8000 frontal. En la siguiente tabla se muestran los rendimientos efectivos por tipo de pala, tanto para la fase 2 como para la fase 3.

**Tabla 6: Rendimiento efectivo de las palas Fase 2 - Fase 3**

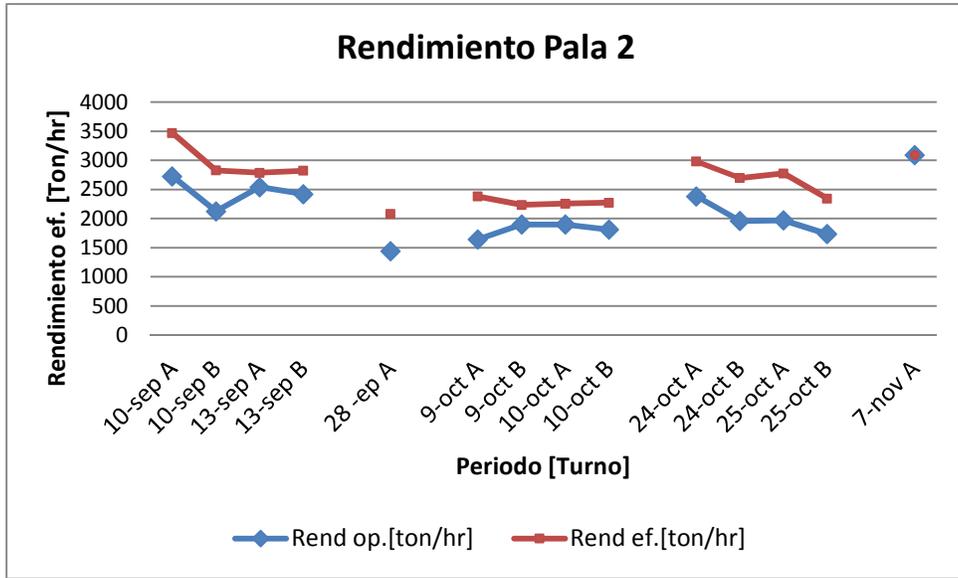
	Fase 2	Fase 3
Rendimiento ef. PC-5500 Frontal [Ton/hr]	2.584	2.832
Rendimiento ef. PC-5500 Excavadora [Ton/hr]	2.020	2.214
Rendimiento ef. PC-8000 Frontal [Ton/hr]	2.887	3.164

### **d) Granulometría**

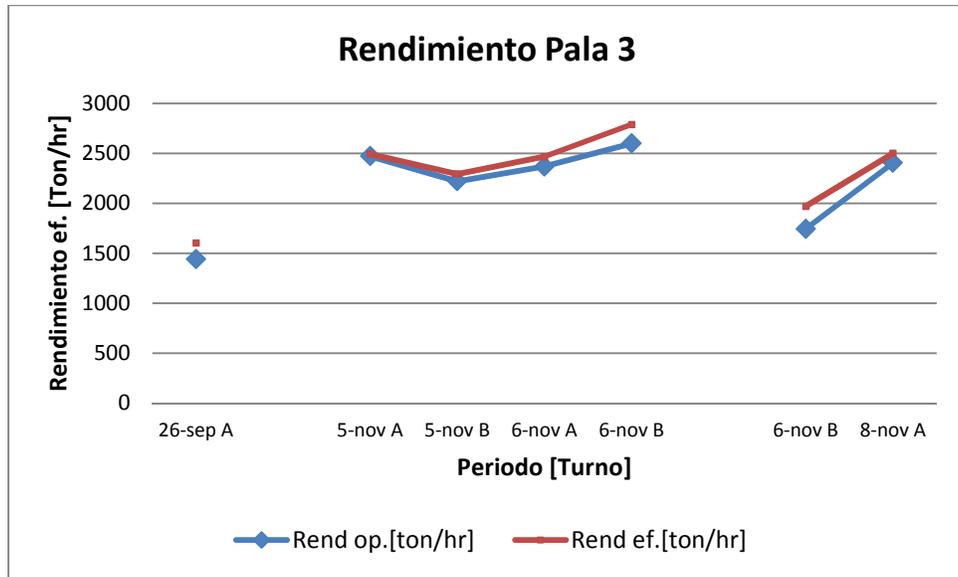
Evidentemente la granulometría influye en el rendimiento efectivo de las palas, para determinar dicha dependencia, se registraron los rendimientos en cada disparo, teniendo presente que cada uno de ellos presenta una granulometría ya cuantificada.

En los siguientes gráficos (figura 61 a 65) se muestran los rendimientos efectivos por turno de cada pala, pero debido a que las fotografías se obtuvieron en el turno A, las estadísticas están referidas sólo a este turno.

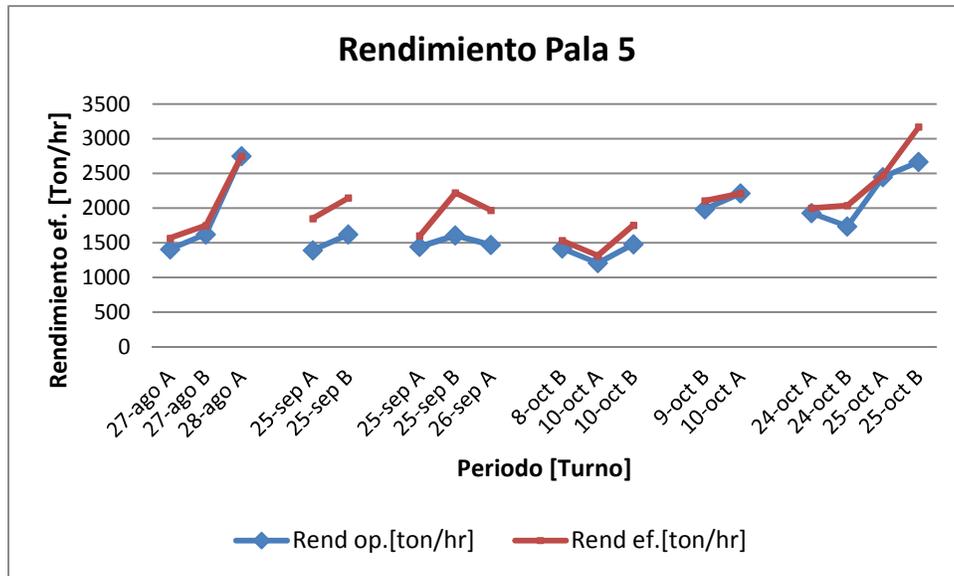
Los rendimientos de cada pala están separados por disparos. Por ejemplo para el caso de la Pala 2, el primer grupo de datos que van desde el 10 de Septiembre turno A hasta el 13 de Septiembre turno B, representan al disparo 965-311. Luego están representados los disparo 965-320, 965-321. 935-308 y 935-309 respectivamente. En azul se muestran los datos del rendimiento operacional (es menor al rendimiento efectivo, ya que incluye el tiempo total en que la pala está en la frente y no sólo el tiempo efectivo de trabajo) y en rojo los datos del rendimiento efectivo. Se observan diferencias de rendimientos entre los disparos, lo que indica ciertamente la incidencia de la granulometría.



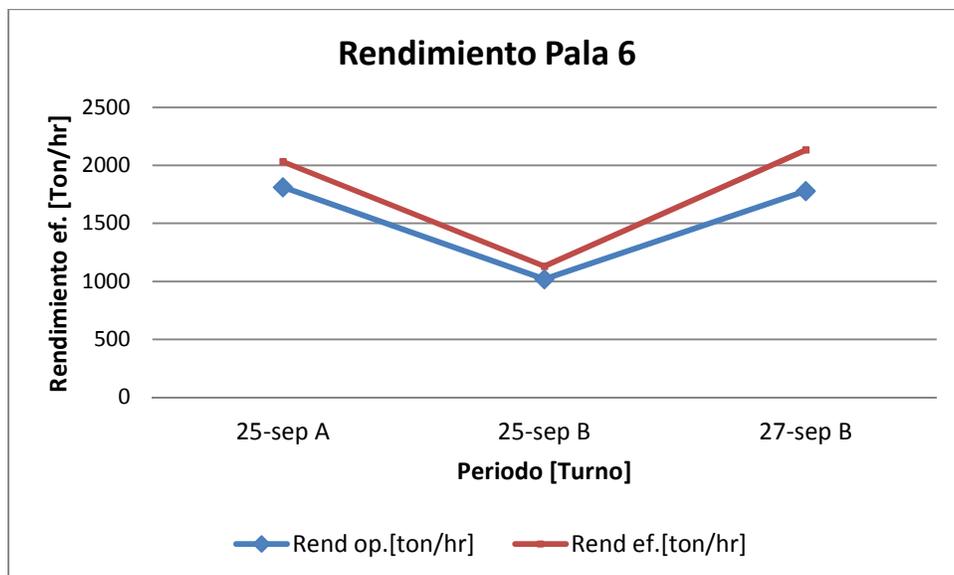
**Figura 61: Rendimiento Pala 2**



**Figura 62: Rendimiento Pala 3**



**Figura 63: Rendimiento Pala 5**



**Figura 64: Rendimiento Pala 6**

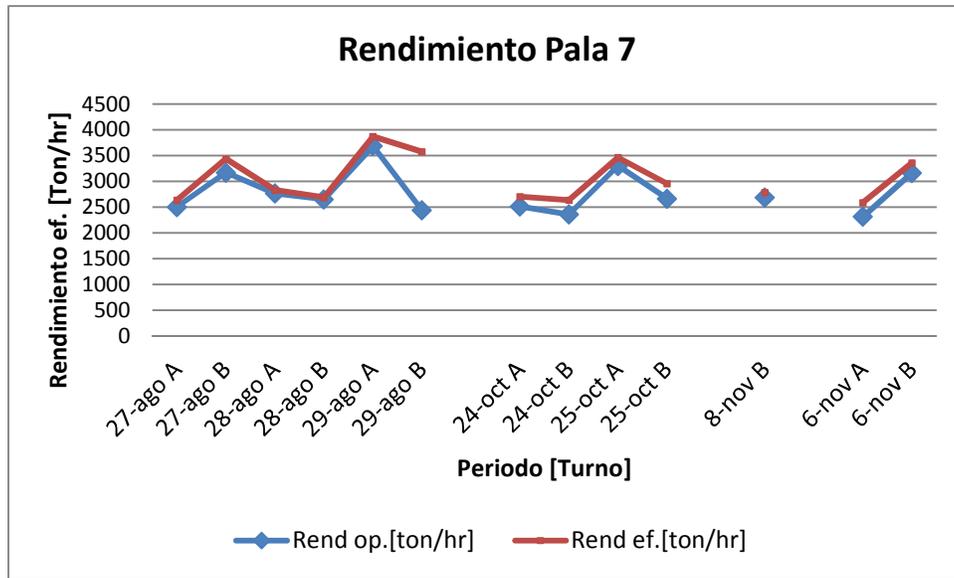


Figura 65: Rendimiento Pala 7

Procesando los datos se obtuvieron modelos para los 3 tipos de palas, en Fase 2 y en Fase 3. De los gráficos siguientes se observa que el rendimiento efectivo de las palas aumenta marginalmente de forma decreciente al disminuir el D80 de la tronadura.

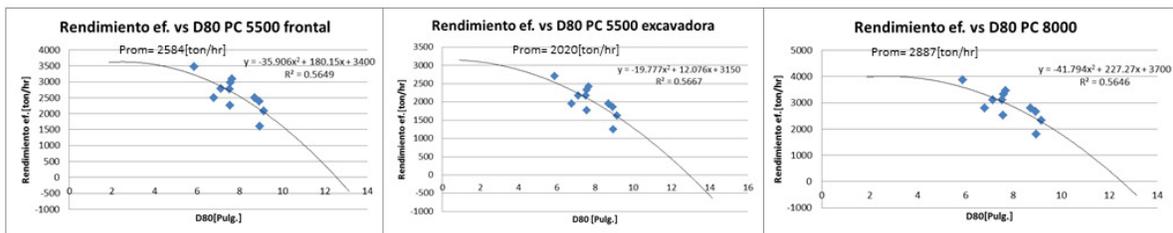


Figura 66: Modelos predictivos del rendimiento de las palas en base a la granulometría Fase 2

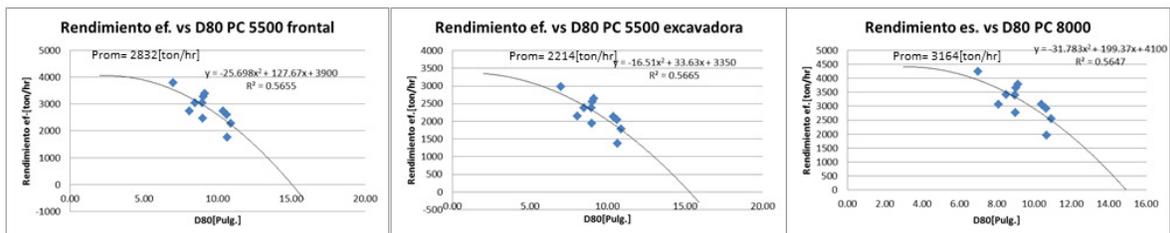


Figura 67: Modelos predictivos del rendimiento de las palas en base a la granulometría Fase 3

### 4.3.3 Análisis de resultados en el rendimiento de la planta

El rendimiento del molino SAG depende de varios factores, entre ellos de la granulometría de entrada, información que no estaba disponible para los efectos de este estudio, sin embargo se conocía la curva ideal de alimentación al SAG, que maximiza su rendimiento, y que fue estimada por los ingenieros de la planta en base a simulaciones con JKSimMet y en base a un análisis estadístico de datos que posee la faena.

Como se dijo anteriormente, Split estima la parte fina de las curvas mediante la utilización de algunos modelos teóricos. Es por ello que esta parte de la curva no refleja fielmente la realidad, lo que se refleja en la divergencia marcada en la parte fina entre las curvas registradas en la mina con respecto a la curva ideal de alimentación al SAG (curva morada). En los siguientes gráficos se comparan dichas curvas, donde el análisis se realiza por banco (figuras 68 a 71).

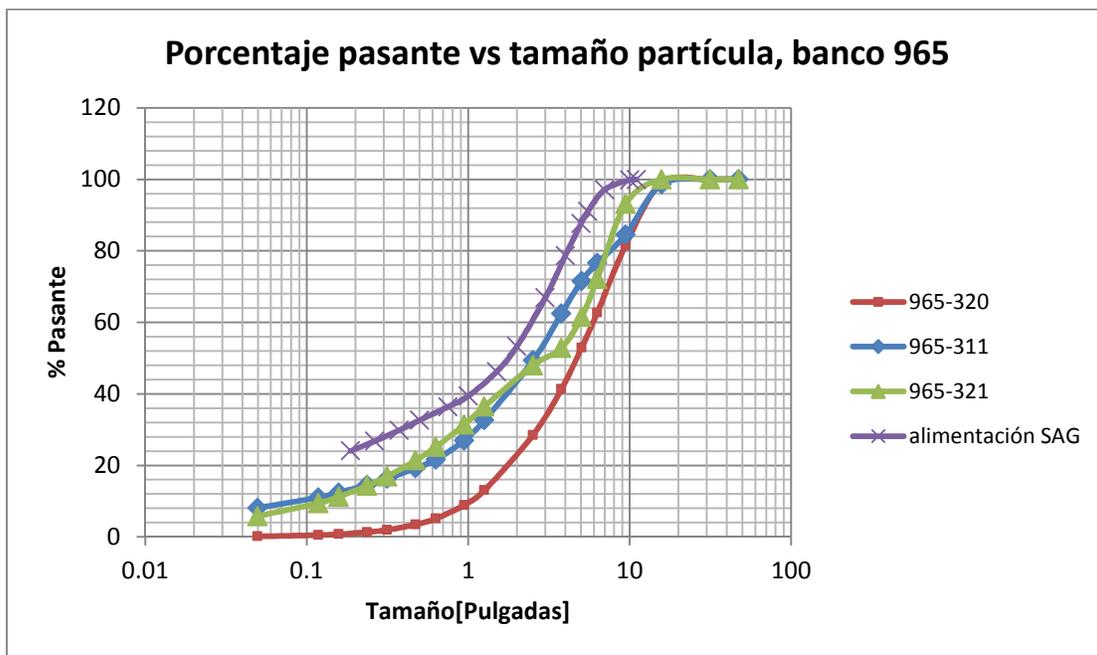


Figura 68: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 965

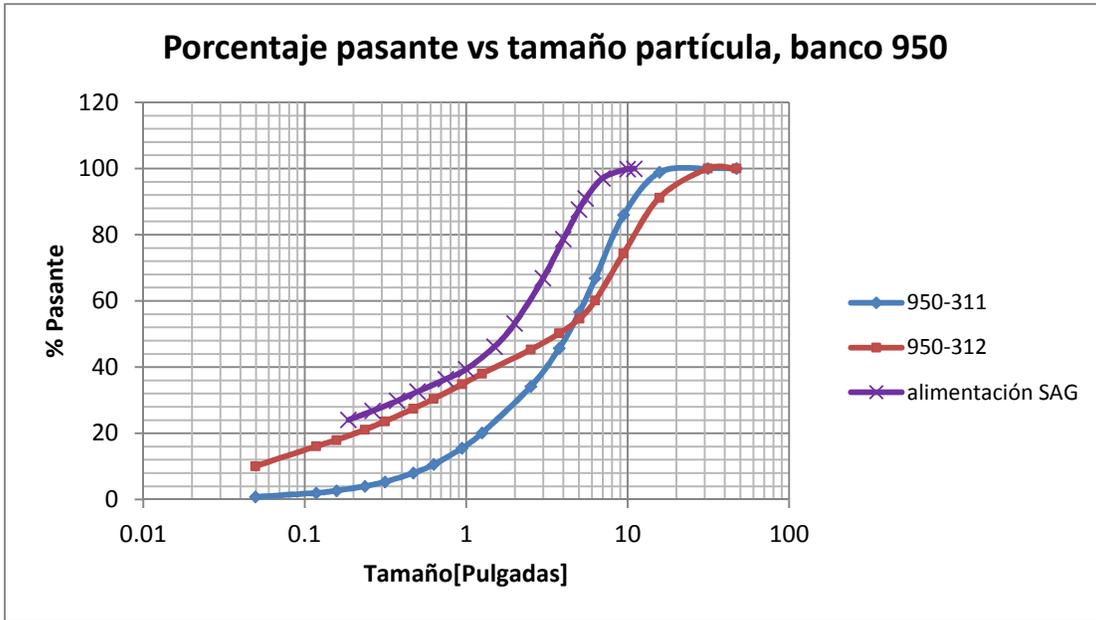


Figura 69: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 950

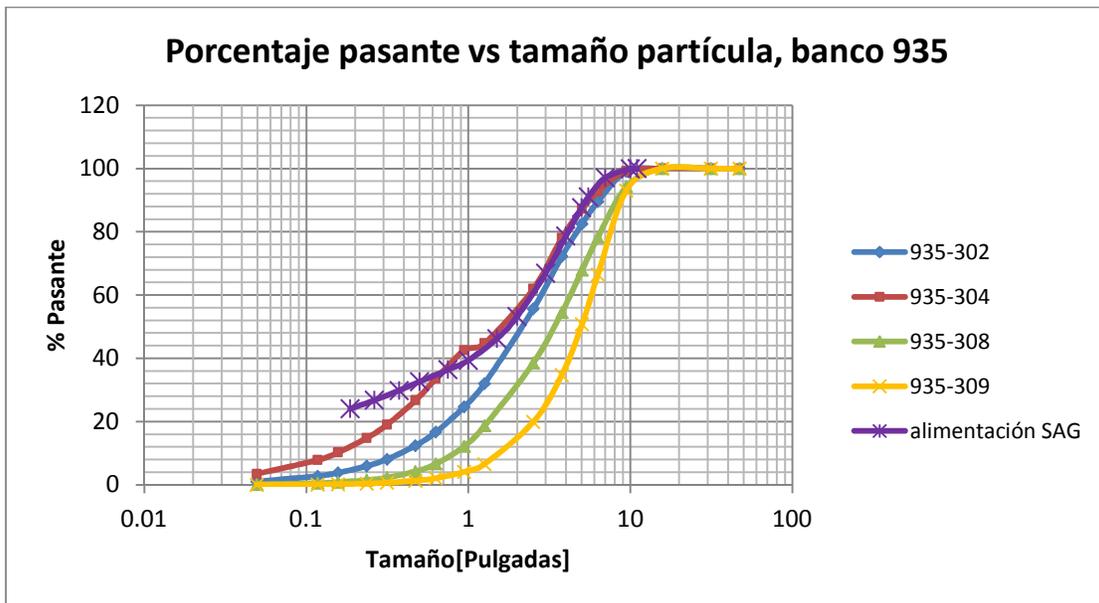
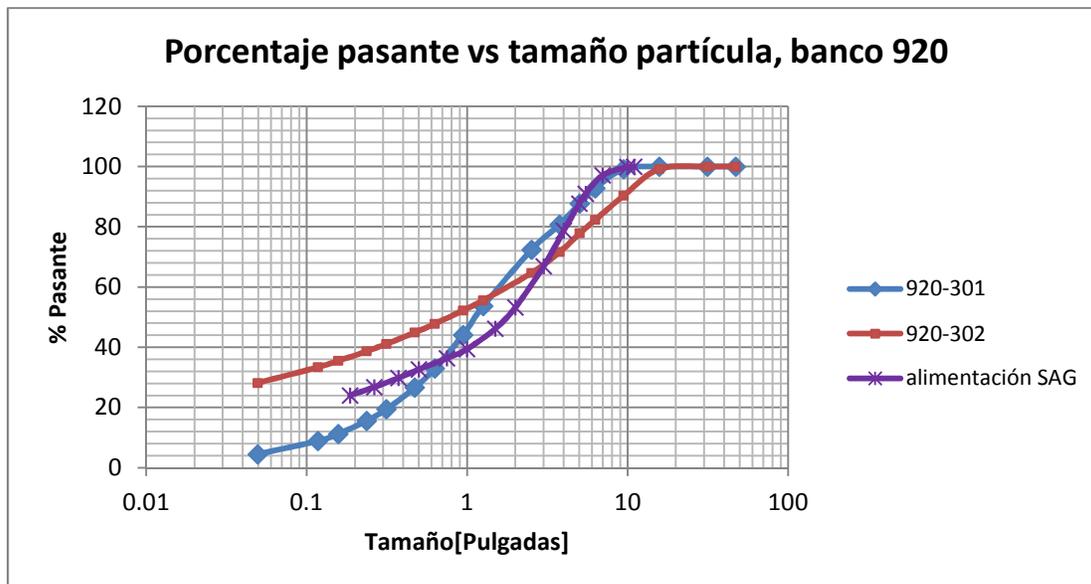


Figura 70: Comparación Curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 935

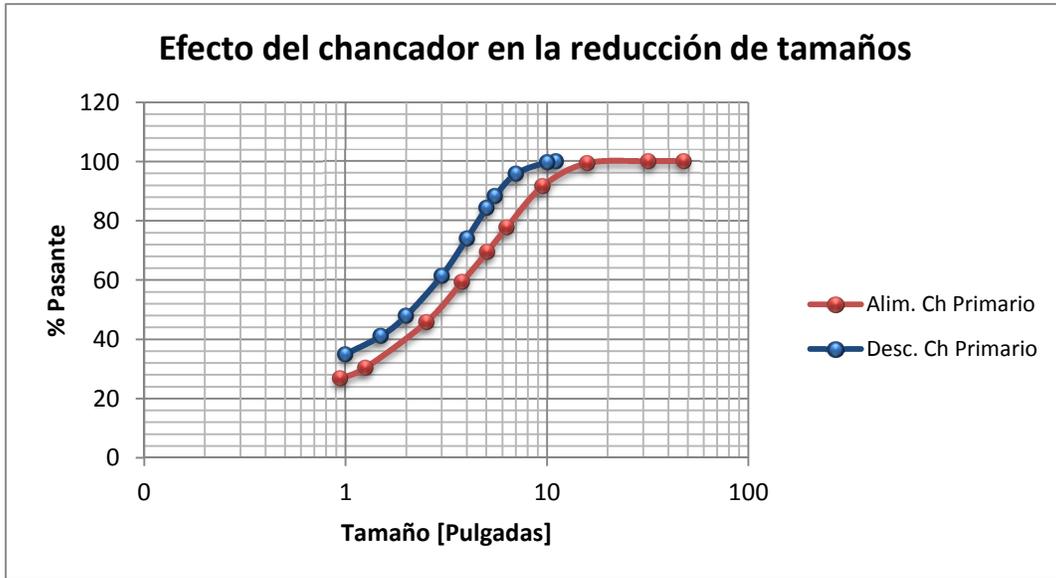


**Figura 71: Comparación curva óptima de alimentación al SAG con los disparos banco 920**

Se observan algunos disparos con bastante finos, incluso más finos que los de la curva de alimentación ideal al molino SAG, tomando en consideración que todavía deben disminuir aún más su rango de tamaños producto del efecto del chancado. Los gráficos anteriores (figura 68 a 71) muestran las curvas de alimentación al chancador, es por ello que se hace necesario encontrar el efecto que produce el chancador en el rango de tamaños de entrada.

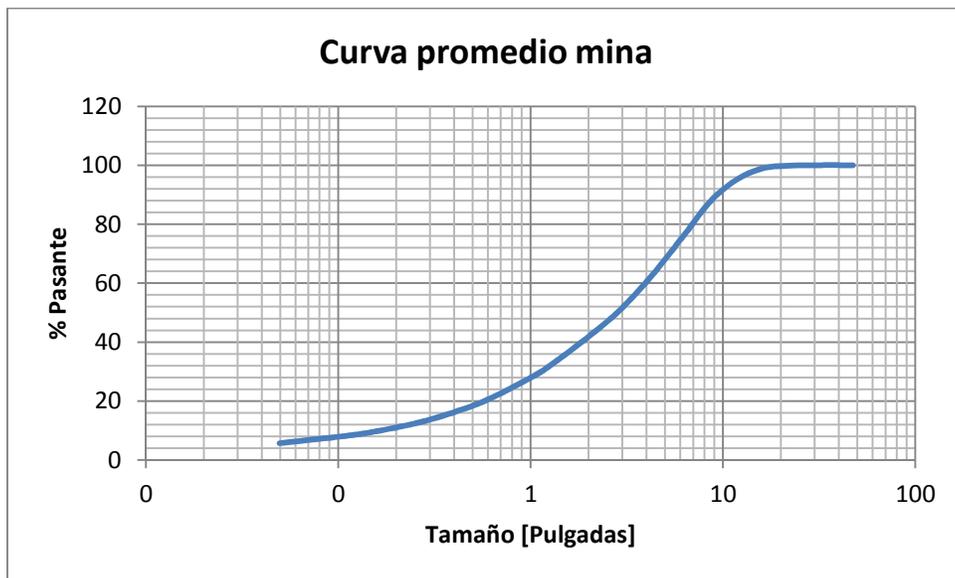
La mina en la actualidad no cuenta con un monitoreo granulométrico on-line en la descarga de los camiones al chancador, sólo cuenta con el monitoreo a la salida del chancador. De los 13 disparos analizados, solamente 3 alimentaron al chancador en más de un 80% de su capacidad en el turno. Teniendo las curvas granulométricas de entrada al chancador y las curvas de salida del chancador de los 3 disparos escogidos, se puede observar el efecto que produce el chancador en los rangos de tamaños, con ello se obtiene una razón de reducción por tamaños.

En el siguiente gráfico se observa el trabajo efectuado por el chancador, donde la razón de reducción se estima solamente para tamaños mayores a 1 [Pulgada], debido a la difícil representatividad de los tamaños menores. Se observa, además, que el chancador actúa preferencialmente en la reducción de la fracción gruesa de tamaños.



*Figura 72: Efecto del chancador en la reducción de tamaños*

Con todas las curvas entregadas por Split se generó una curva promedio de la mina como se muestra en la figura siguiente. Además, teniendo el factor de reducción por tamaños, se puede calcular la curva de entrada al chancador, que luego genere la curva ideal de alimentación al SAG.



*Figura 73: Curva promedio estimada*

## 4.4 Análisis de variables

La recopilación de los antecedentes se realizó teniendo en cuenta las principales variables que afectan al resultado granulométrico en términos generales. En esta etapa se procedió a filtrar las variables por orden de relevancia.

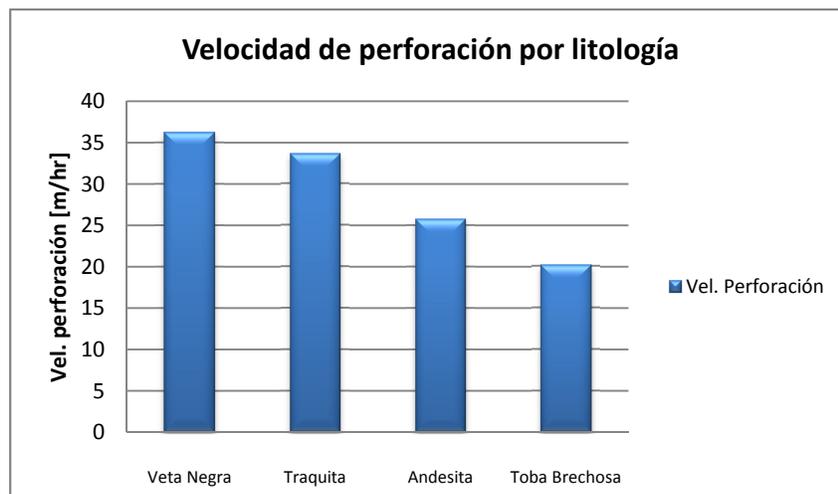
### 4.4.1 Variables representativas

Se entiende por variable representativa a la variable o al conjunto de variables que explican el resultado de la tronadura.

Existen muchas variables que juegan un rol menor en la tronadura y que no interesa estudiarlas en detalle, pero existen otras que efectivamente controlan este proceso. Para identificar dichas variables se realizó un análisis estadístico univariable y multivariable.

En este sentido, se estudió el comportamiento de cada variable con respecto al D80, como asimismo el comportamiento de cada una con respecto a la otra. Así, se formaron grupos de variables cuya correlación entre ellas es alta; es decir, son dependientes. Este análisis condujo a la formación de 2 grandes grupos: uno es dominado por el factor de carga y el otro por la competencia de la roca. El factor de carga depende de la malla y del tipo de explosivo; por otro lado, la competencia de la roca depende de la litología y de la densidad de esta.

Para cuantificar la competencia de la roca se procedió a registrar la velocidad de perforación instantánea promedio de cada pozo (entre la perforadora DMM y d-75), dentro de los 13 disparos escogidos. Así mientras menor es la velocidad de perforación mayor será la competencia de la roca. En la figura siguiente se observa la dependencia entre la velocidad de perforación y la litología, donde la litología complicada de la mina es la Toba Brechosa. El análisis completo se encuentra en anexos.



**Figura 74: Correlación entre la velocidad de perforación promedio y la litología**

Las variables representativas se dividen en variables gestionables y variables no gestionables. Las primeras se pueden administrar o modificar para obtener distintos resultados granulométricos, pero no se pueden modificar arbitrariamente, ya que están acotadas por restricciones ambientales, operacionales y geomecánicas. Las variables no gestionables son las que no se pueden modificar, por ejemplo la litología.

En la siguiente tabla se observa la influencia en el resultado granulométrico de todas las variables, tanto las variables gestionables como las no gestionables. En los anexos se observa el estudio de las principales variables.

**Tabla 7: Influencia de cada variable en el resultado granulométrico**

<b><i>Variables gestionables</i></b>	<b><i>Influencia en el resultado granulométrico</i></b>
<b>Malla</b>	Influye de manera significativa
<b>Factor de carga</b>	Influye de manera significativa
<b>Explosivo</b>	Influye de manera significativa
<b>Secuencia de salida</b>	Influye, pero falta información de estructuras menores
<b>Retardos</b>	No se concluye sobre su influencia
<b>Taco</b>	Influye de manera significativa
<b><i>Variables no gestionables</i></b>	<b><i>Influencia en el resultado granulométrico</i></b>
<b>Litología</b>	Influye de manera significativa
<b>Competencia de la roca</b>	Influye de manera significativa
<b>Estructuras</b>	Influye, pero falta información de estructuras menores
<b>Densidad de la roca</b>	Influye de manera significativa
<b>Diámetro de perforación</b>	Constante
<b>Galerías subterráneas</b>	No influye, pero faltan más mediciones
<b>Zona</b>	Influye de manera significativa

#### **4.4.2 Variable dominante**

Como ya se había mencionado, el factor de carga y la litología (correlacionada con la competencia de la roca) son las variables relevantes que explican el resultado granulométrico. Cuando se analiza la influencia de la litología en el resultado granulométrico, no se sacan conclusiones tan claras y el efecto asociado al cambio de litología no es tan marcado. Por el contrario, cuando se

analiza la influencia de factor de carga, se obtienen resultados contundentes ya que, casi ante cualquier condición, el factor de carga es la variable dominante en el proceso de tronadura.

Para aclarar más aún esta situación se analizó la influencia del factor de carga en la litología Toba Brechosa, que es la litología que presenta los mayores inconvenientes en la mina. Se estudiaron 3 disparos en dicha litología como muestra la siguiente tabla.

**Tabla 8: Influencia del factor de carga en el D80**

<b>Litología</b>	<b>Disparo</b>	<b>Factor de carga[gr/ton]</b>	<b>D80[Pulgadas]</b>
Toba Brechosa	950-312	312	10,5
Toba Brechosa	935-308	372	8,1
Toba Brechosa	935-309	372	7,6

Se concluye que aunque existan litologías problemáticas, si se aplica un factor de carga adecuado se van a obtener buenos resultados granulométricos. Queda claro que el factor de carga es la variable dominante del proceso de fragmentación de la roca, lo cual permite el sustento para la elaboración de diferentes modelos en función del factor de carga.

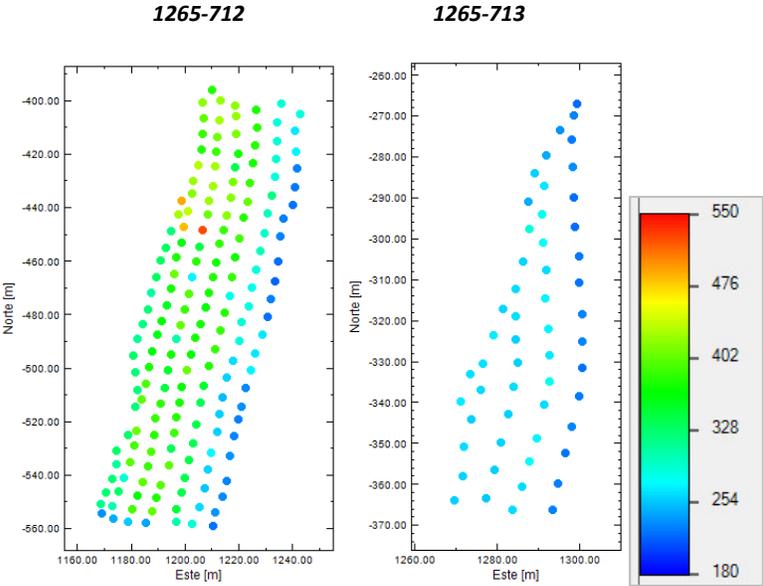
En presencia de Toba Brechosa se obtuvo un aumento del 18% en el D80, comparado con una litología promedio de la mina.

Como se ha mencionado anteriormente, el análisis de las variables se realizó a diferentes escalas. En la tabla 9 se muestra el factor de carga promedio de cada disparo.

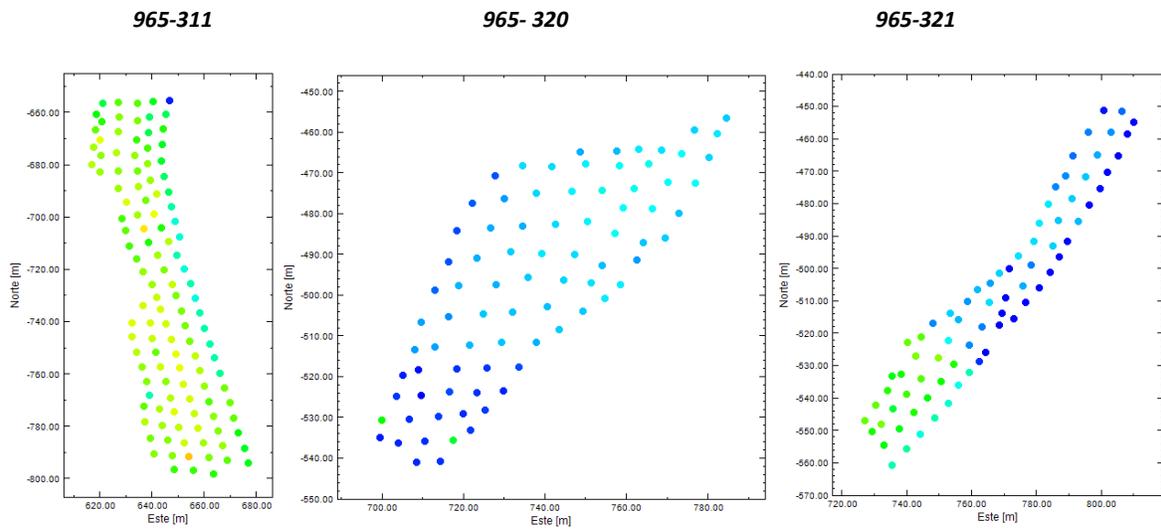
**Tabla 9: Factor de carga promedio por disparo**

<b>Disparo</b>	<b>Factor de Carga [grs/ton]</b>
1265-712	336,1
965-311	393,6
935-302	528,7
935-304	450,9
965-320	241,5
950-311	255,3
950-312	365,5
965-321	274,4
1265-713	250,3
935-308	369,5
920-301	380,9
920-302	485,1
935-309	332,4

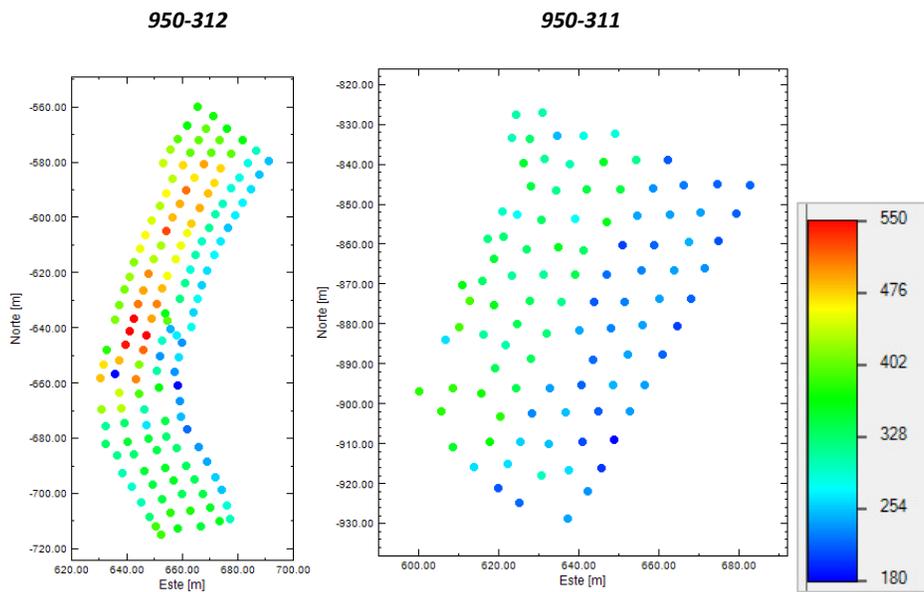
El factor de carga promedio entrega una visión general del resultado granulométrico, pero no entrega una visión acerca de su variabilidad, por lo cual es necesario un análisis del factor de carga zonificado. En las siguientes figuras se observa el factor de carga [grs/ton] por pozo en cada disparo. En ellas se aprecia que en la zona de buffer el factor de carga es menor que en el resto del disparo, también se observan sectores con un factor de carga bastante heterogéneo, principalmente asociados a disparos con diferentes mallas y emplazados en caving.



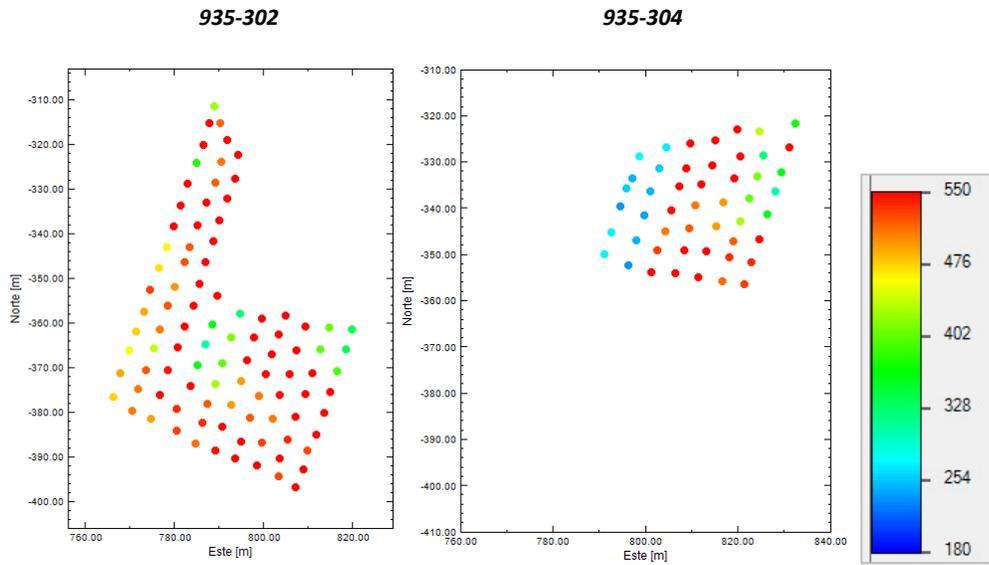
**Figura 75: Factor de carga en el banco 1265**



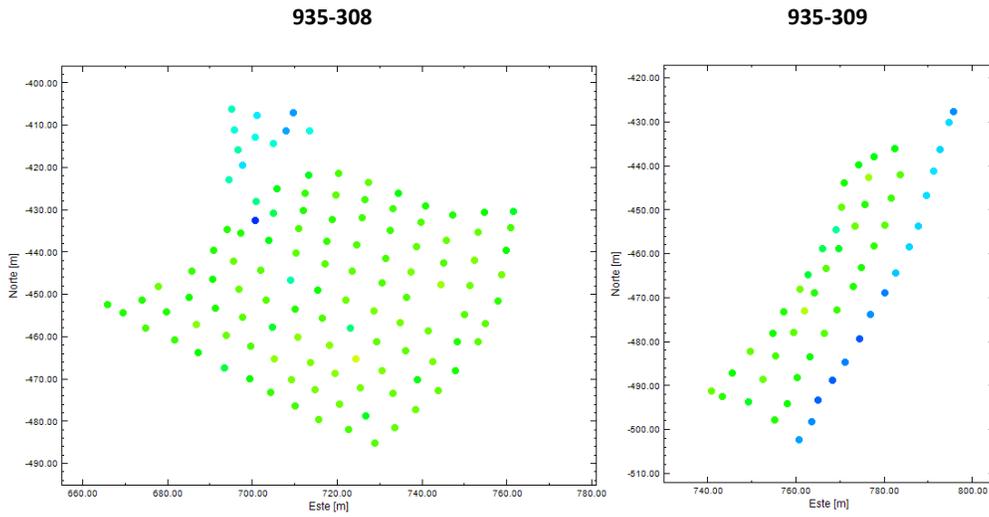
**Figura 76: Factor de carga en el banco 965**



**Figura 77: Factor de carga en el banco 950**

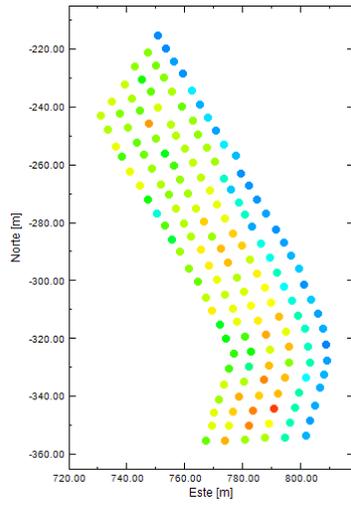


**Figura 78: Factor de carga en el banco 935**

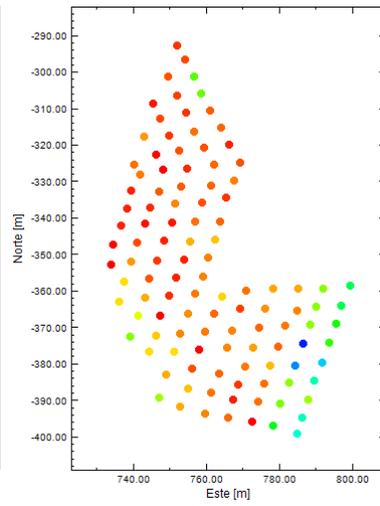


**Figura 79: Factor de carga en el banco 935**

**920-301**

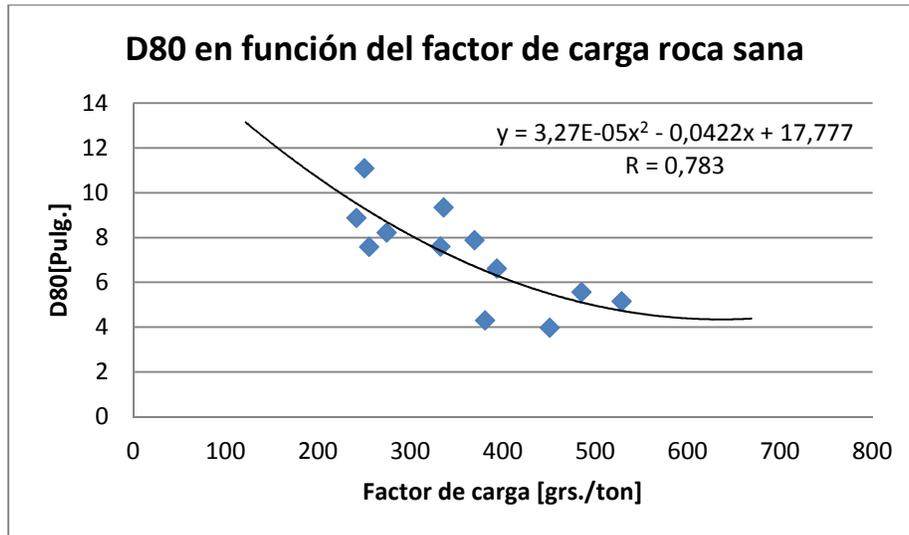


**920-302**

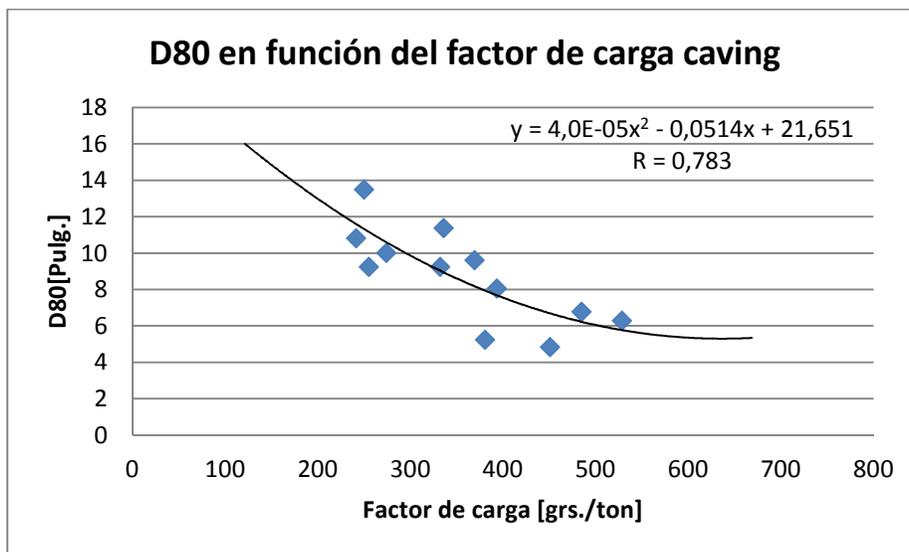


**Figura 80: Factor de carga en el banco 920**

En los siguientes gráficos se observa la fuerte dependencia entre el factor de carga y el D80, tanto en roca sana como en caving. Con estos modelos y en las condiciones operacionales actuales, se estima que la granulometría menor que se puede obtener en la mina El Soldado corresponde a un D80 de aproximadamente 4 Pulgadas.

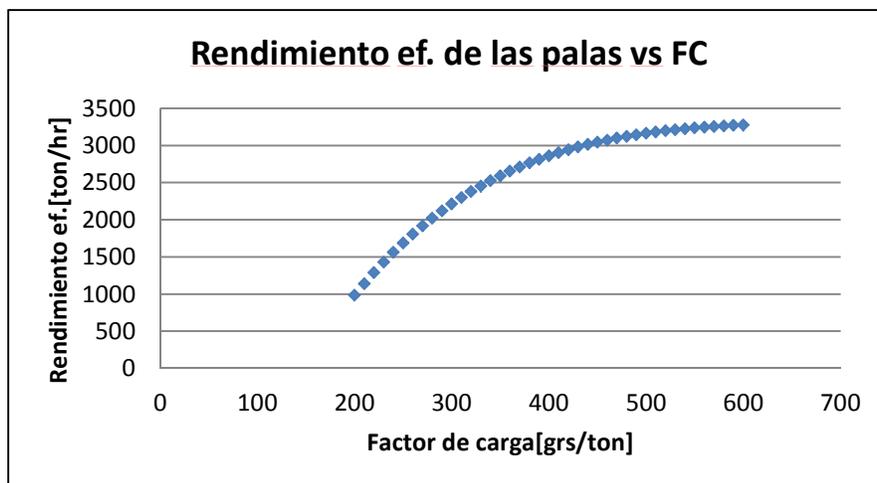


*Figura 81: Modelo D80 en función del factor de carga en roca sana*



*Figura 82: Modelo D80 en función del factor de carga en caving*

A partir de las relaciones del D80 en función del factor de carga y las relaciones del rendimiento efectivo de las palas en función del D80, se obtiene el modelo del rendimiento efectivo de las palas en función del factor de carga (figura 83).



*Figura 83: Modelo rendimiento efectivo de las palas en función del factor de carga*

De los modelos anteriores, se observa además que un factor de carga mayor a 500 [gr/ton] no aporta significativamente al proceso de fragmentación de la roca; sólo conduce a un aumento de los costos de perforación y tronadura, y a una disminución de la eficiencia del explosivo por tonelada arrancada. En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de pozos con sobrecarga de explosivo (pozos con más de 500 [Kg] de explosivo).

*Tabla 10: Porcentaje de pozos con sobrecarga y cantidad de explosivo*

Disparo	Pozos con sobrecarga [%]	Sobrecarga de explosivo [kg]
1265-712	0,6	24
965-311	0	0
935-302	72,9	4.802
935-304	53,1	1.699
965-320	0	0
950-311	0	0
950-312	6,9	296
965-321	0	0
1265-713	0	0
935-308	0	0
920-301	2,5	34
920-302	63,2	1.712
935-309	0	0

El costo asociado a la sobrecarga de explosivo, solamente en los 13 disparos estudiados es de 5.637 [US\$].

Como el factor de carga es la variable relevante, es posible obtener la curva promedio de la mina en función de esta variable. En la siguiente figura se muestran 2 curvas con distinto factor de carga, y también se muestra la curva ideal de alimentación al SAG.

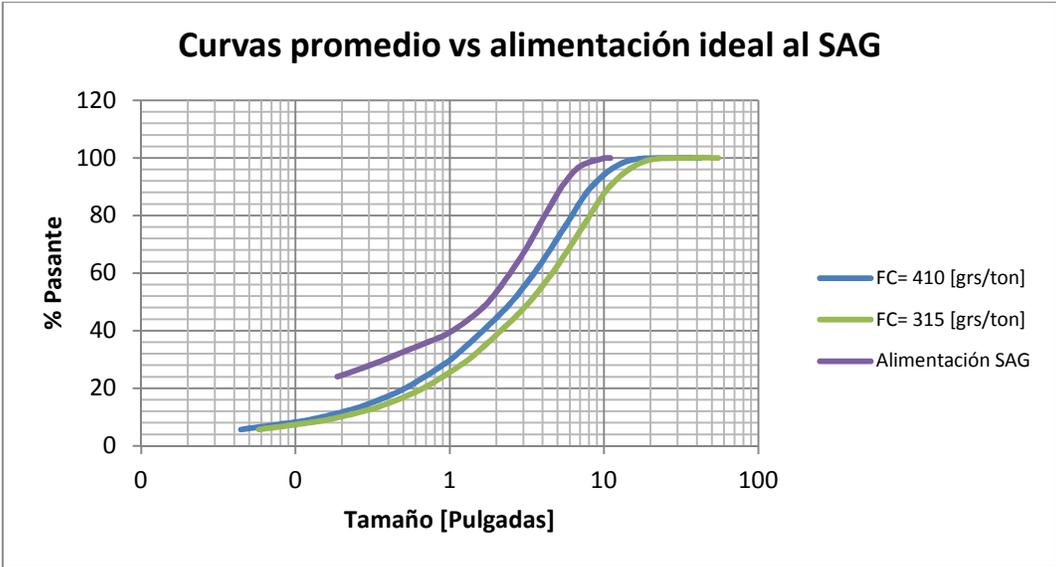
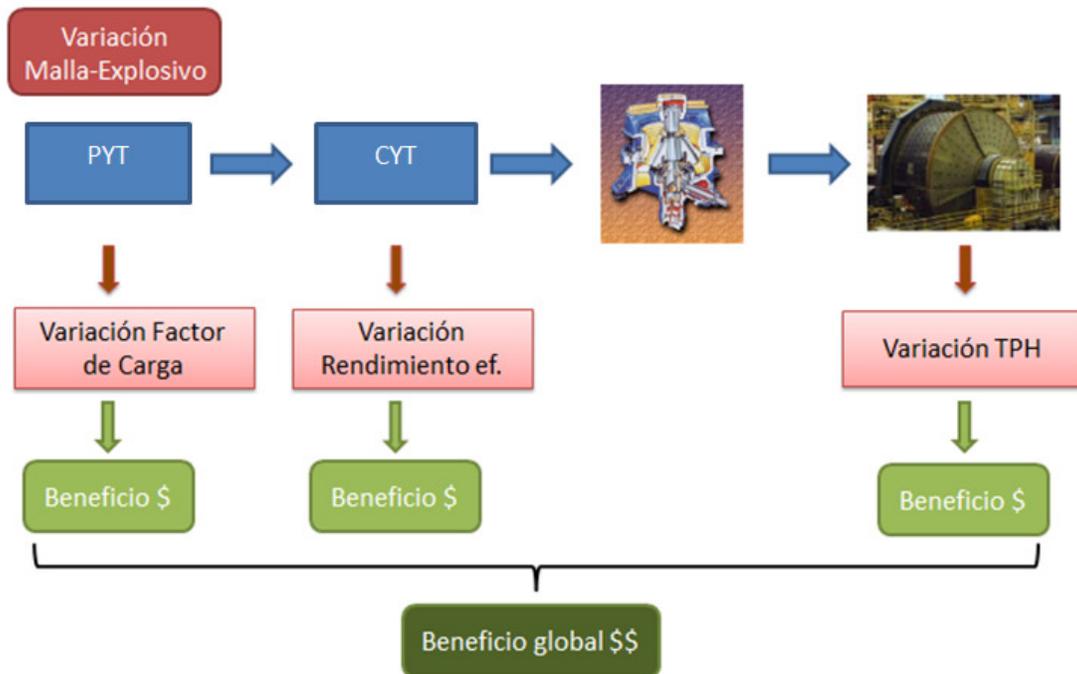


Figura 84: Curva promedio de la mina dependiente del factor de carga

## CAPÍTULO 5: ANÁLISIS ECONÓMICO

Si se varía la combinación malla-explosivo, se producirán efectos operacionales y económicos en la perforación y tronadura, y en los procesos aguas abajo. Dichos efectos se pueden cuantificar en cada etapa y en forma global como muestra el siguiente diagrama.



*Figura 85: Diagrama del análisis económico global*

Para tomar decisiones acertadas es necesario trabajar en torno a la maximización del beneficio neto del proceso mina-planta; pero, para una mejor comprensión, se dividió el análisis económico en la mina y en la planta.

## 5.1 Análisis económico de la mina

Estudiando todas las combinaciones malla-explosivo utilizadas en la mina, se calculó el factor de carga para cada configuración. Luego, mediante los modelos definidos anteriormente, se estimó el D80 y el rendimiento efectivo de las palas. Con cada configuración se obtuvieron los metros perforados anuales y los kilogramos de explosivos; y teniendo además el costo promedio anual de perforación, el costo de los explosivos y de los accesorios de voladura, se calculó el costo anual de perforación y tronadura.

Contando con los datos del tonelaje total anual removido y del tonelaje de explosivos usados en el año, se obtuvo el factor de carga promedio de la mina. Además, se cuenta con los datos del rendimiento anual de las palas, estos datos son el sustento del caso base de la mina. Al variar la malla-explosivo, se produce efectivamente una variación de la granulometría y con ello una variación en el rendimiento efectivo de las palas. Una variación en el rendimiento de las palas implica una variación del tonelaje anual movido, provocando excedentes o déficits con respecto al caso base.

Para la cuantificación del beneficio por concepto de la variación del tonelaje anual en la mina de cada configuración malla-explosivo, se usó la teoría del costo de oportunidad. Así, se calculó el número de palas necesarias para mover la variación del tonelaje anual en condiciones normales o en condiciones actuales de la mina. Se cuantificó el costo de arriendo y de mantención de las palas extras, mediante los contratos actuales de arriendo y de mantenimiento de éstas.

El beneficio neto en la mina corresponde al beneficio por el concepto del aumento o disminución del tonelaje anual menos el costo de perforación y tronadura destinado para ello. De la siguiente tabla se observa que varias configuraciones presentan beneficios anuales netos negativos; también es posible apreciar que algunas configuraciones malla-explosivo entregan resultados granulométricos similares, pero evidentemente con costos distintos.

Se realizó el cálculo económico para la Fase 2 y Fase 3, ponderando por los respectivos tonelajes anuales. En la Fase 2 se divide el tonelaje entre roca sana, que representa el 60% del tonelaje extraído anual, y caving que representa el 40%. Para el análisis económico se desprecia el efecto de la zona de borde. Con esto cada zona tendrá una malla-explosivo óptima asociada, como muestran las siguientes tablas.

**Tabla 11: Análisis económico en la mina Fase 2 roca sana**

Malla	Explosivo	FC [gr/ton]	D80 [Pulgadas]	Rend. ef. [ton/hr]	Costo PYT [US\$]	Variación tonelaje [Ton]	Beneficio [US\$]
5X5	ANFO	407	6,01	2.896	14.555.693	5.034.663	-3.223.000
	B-930	529	4,61	3.213	16.599.053	7.751.575	-2.053.000
	B-950	626	4,17	3.287	18.256.270	8.378.131	-3.259.000
	EMULTEX	688	4,22	3.279	19.374.656	8.313.364	-4.424.000
5,5X6,5	ANFO	285	8,41	2.074	10.178.806	-2.005.742	-2.655.000
	B-930	370	6,65	2.713	11.607.730	3.467.291	-145.000
	B-950	438	5,57	3.009	12.766.622	5.998.644	518.000
	EMULTEX	481	5,04	3.128	13.548.710	7.022.201	473.000
6X7	ANFO	243	9,47	1.598	8.664.103	-6.079.072	-4.072.000
	B-930	315	7,74	2.340	9.880.389	274.660	-715.000
	B-950	373	6,59	2.729	10.866.827	3.602.378	693.000
	EMULTEX	410	5,98	2.905	11.532.533	5.113.275	1.115.000
7X8	ANFO	182	11,18	679	6.498.077	-13.948.854	-7.570.000
	B-930	236	9,64	1.513	7.410.292	-6.802.228	-3.338.000
	B-950	279	8,54	2.019	8.150.120	-2.477.615	-966.000
	EMULTEX	307	7,90	2.278	8.649.400	-254.641	135.000

De la tabla anterior se observa que la mejor combinación malla-explosivo, en el sector de roca sana en Fase 2, se obtiene con una malla de 6x7 [mxm] y Emultex, lo que entrega un excedente con respecto al caso base de 1,1 [MUS\$].

**Tabla 12: Análisis económico en la mina Fase 2 caving**

Malla	Explosivo	FC [gr/ton]	D80 [Pulgadas]	Rend. ef. [ton/hr]	Costo PYT [US\$]	Variación tonelaje [Ton]	Beneficio [US\$]
5X5	ANFO	407	6,01	2.896	9.703.795	3.356.442	-2.149.000
	B-930	529	4,61	3.213	11.066.035	5.167.716	-1.369.000
	B-950	626	4,17	3.287	12.170.847	5.585.420	-2.173.000
	EMULTEX	688	4,22	3.279	12.916.437	5.542.242	-2.949.000
5,5X6,5	ANFO	285	8,41	2.074	6.785.871	-1.337.161	-1.770.000
	B-930	370	6,65	2.713	7.738.486	2.311.528	-97.000
	B-950	438	5,57	3.009	8.511.082	3.999.096	345.000
	EMULTEX	481	5,04	3.128	9.032.474	4.681.467	315.000
6X7	ANFO	243	9,47	1.598	5.776.069	-4.052.715	-2.714.000
	B-930	315	7,74	2.340	6.586.926	183.107	-477.000
	B-950	373	6,59	2.729	7.244.552	2.401.585	462.000
	EMULTEX	410	5,98	2.905	7.688.356	3.408.850	743.000
7X8	ANFO	182	11,18	679	4.332.051	-9.299.236	-5.046.000
	B-930	236	9,64	1.513	4.940.194	-4.534.818	-2.226.000
	B-950	279	8,54	2.019	5.433.414	-1.651.743	-644.000
	EMULTEX	307	7,90	2.278	5.766.267	-169.761	90.000

De la tabla anterior se observa que la mejor combinación malla-explosivo, en el sector de caving en Fase 2, se obtiene con una malla de 6x7 [mxm] y Emultex, lo que entrega un excedente con respecto al caso base de 0,74 [MUS\$]. Cabe señalar que la malla de 5,5x6,5 [mxm] también entrega excedentes.

**Tabla 13: Análisis económico en la mina Fase 3**

Malla	Explosivo	FC [gr/ton]	D80 [Pulgadas]	Rend. ef. [ton/hr]	Costo PYT [US\$]	Variación tonelaje [Ton]	Beneficio [US\$]
5X5	ANFO	407	6,01	3.382	22.393.374	10.245.653	-3.702.000
	B-930	529	4,61	3.639	25.537.005	13.328.320	-4.681.000
	B-950	626	4,17	3.701	28.086.569	14.077.353	-6.704.000
	EMULTEX	688	4,22	3.695	29.800.593	13.999.938	-8.473.000
5,5X6,5	ANFO	285	8,41	2.754	15.659.702	2.694.654	-2.271.000
	B-930	370	6,65	3.239	17.858.045	8.529.308	-372.000
	B-950	438	5,57	3.471	19.640.957	11.319.023	-196.000
	EMULTEX	481	5,04	3.568	20.839.575	12.476.510	-582.000
6X7	ANFO	243	9,47	2.400	13.329.389	-1.558.613	-2.927.000
	B-930	315	7,74	2.954	15.200.598	5.103.823	-120.000
	B-950	373	6,59	3.251	16.718.196	8.676.110	871.000
	EMULTEX	410	5,98	3.389	17.738.448	10.326.575	1.010.000
7X8	ANFO	182	11,18	1.726	9.997.042	-9.661.143	-5.284.000
	B-930	236	9,64	2.337	11.400.449	-2.308.573	-1.525.000
	B-950	279	8,54	2.713	12.538.647	2.199.011	502.000
	EMULTEX	307	7,90	2.907	13.303.836	4.533.417	1.377.000

De la tabla anterior se observa que la mejor combinación malla-explosivo en la Fase 2 se obtiene con una malla de 7x8 [mxm] y Emultex, lo que entrega un excedente con respecto al caso base de 1,37 [MUS\$].

## 5.2 Análisis económico de la planta

Se compararon todas las curvas granulométricas estimadas de entrada al molino SAG con la curva ideal de alimentación, con lo cual se obtiene la curva que mejor ajusta y su respectivo factor de carga.

En las siguientes figuras se observa que existe una curva tanto para el caso de roca sana como para caving. Esta se ajusta perfectamente en cada caso a la curva ideal de alimentación al SAG en los rangos de 1 a 2 [Pulgadas] y de 4,5 [Pulgadas] en adelante; en el rango intermedio existe una pequeña separación entre las curvas.

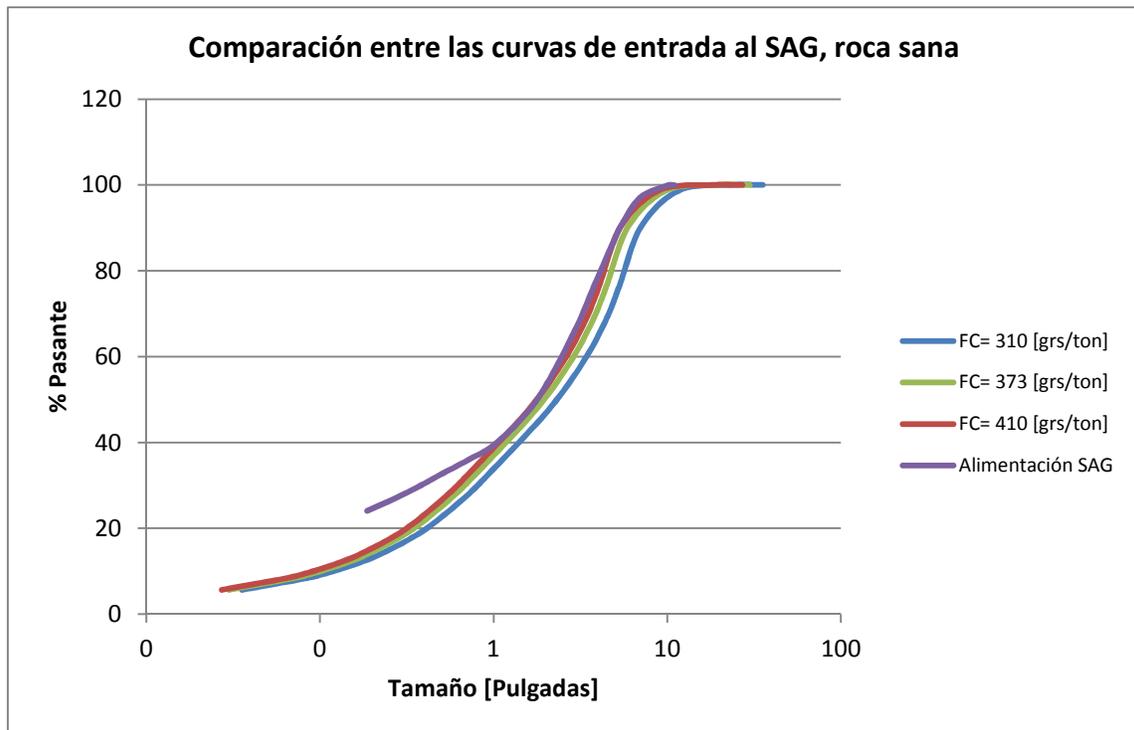
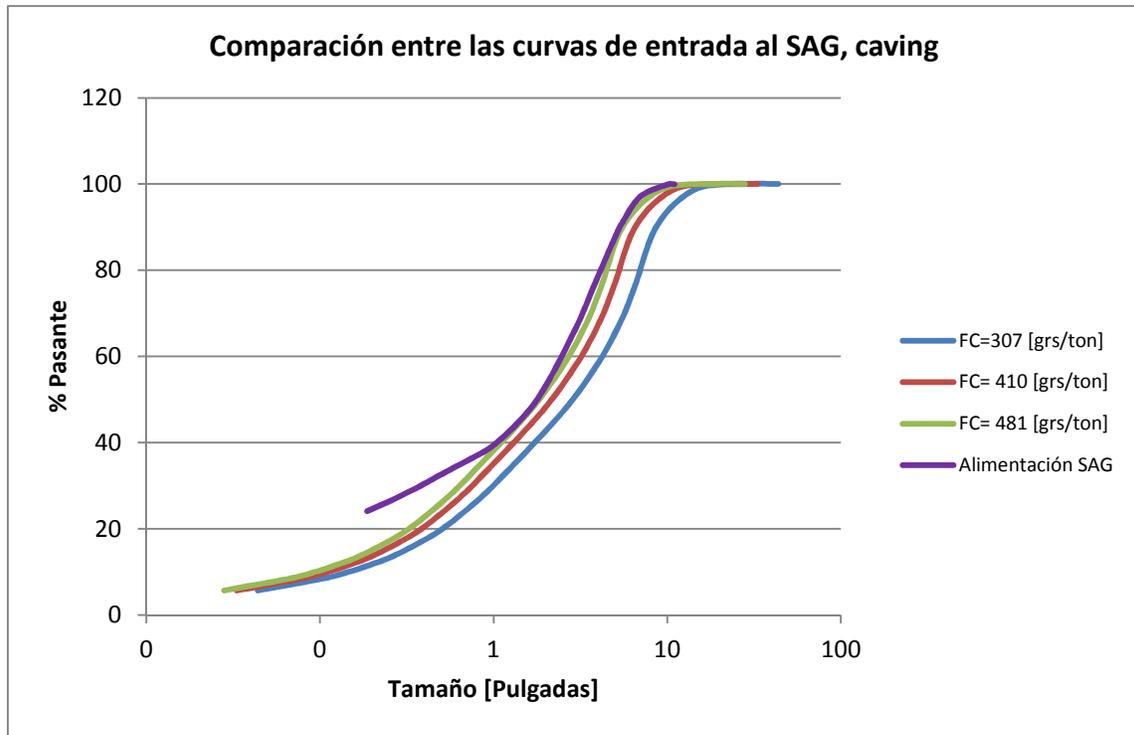


Figura 86: Comparación curvas de entrada al SAG con la curva ideal al SAG, roca sana



**Figura 87: Comparación curvas de entrada al SAG con la curva ideal al SAG, caving**

Cada configuración malla-explosivo estudiada tiene implícita una curva de distribución granulométrica; la curva que mejor se ajusta va a ser considerada como el caso óptimo, la curva con el factor de carga promedio anual es la curva base.

El aumento de las tph del molino SAG con respecto al caso base se calculó mediante un análisis estadístico. A partir de los datos mensuales del 2012, se estableció un caso conservador y se cuantificó el aumento de las tph por medio de la varianza de los datos, la varianza es de 33,9. Luego se calculó el beneficio neto al aumentar en esa cantidad el rendimiento horario del molino. En la siguiente tabla se muestran los cálculos realizados, se utiliza un precio del cobre de 3,5 [US\$/lb].

El beneficio asociado es de 12,8 [MUS\$], que equivale a 10 veces el beneficio que se puede obtener en la mina, por lo que el enfoque del proceso de perforación y tronadura debería estar alineado para satisfacer primordialmente los requerimientos del molino SAG.

**Tabla 14: Análisis económico en la planta**

	Unidad	
Aumento TPH	[Tph]	33,9
Horas SAG	[hrs]	24
Días	[días]	365
Tratamiento año	[Ton]	281.522
Recuperación metalúrgica	[%]	82,2
Ley promedio	[%]	0,83
Producción Cu fino	[Ton]	1.921
Ley concentrado	[%]	25
Producción concentrado	[Ton]	7.683
Producción Cu fino	[lb]	4.234.400
Disponibilidad SAG	[%]	94,8
Aumento rendimiento SAG	[Tph]	33,9
Aumento tonelaje anual por mayor rendimiento SAG	[Ton]	281.522
Costo mina	[US\$/Ton]	1,5
Gasto mina marginal	[US\$]	422.283
Costo planta	[US\$/Ton]	10
Costo planta marginal	[US\$/Ton]	3
Gasto por mayor procesamiento en Planta	[US\$]	844.566
Gasto mina-planta	[US\$]	1.266.848
Costo operación El Soldado	[US\$/lb]	29,9
Costo transporte a Chagres	[US\$/Ton]	9
Costo TC	[US\$/Ton]	56
Costo RC	[US\$/lb]	5,6
Gasto transporte a Chagres	[US\$]	69.146
Gasto TC	[US\$]	430.239
Gasto RC	[US\$]	237.126
Costo FyR	[US\$/lb]	17,4
Costo total marginal	[US\$/lb]	47,3
Beneficio neto adicional	[US\$]	<b>12.817.039</b>

### 5.3 Parámetros óptimos de diseño

La combinación malla-explosivo óptima coincide para los análisis económicos por separado tanto de la mina como de la planta, excepto para el caso de caving en la Fase 2, donde según el criterio económico de la mina, la malla óptima es de 6x7 [mxm] y según planta, es de 5,5x6,5 [mxm]. Ambas configuraciones presentan un excedente con respecto al caso base, pero se escoge aquella que maximiza las tph del molino SAG.

En la siguiente tabla se muestran los resultados que maximizan el beneficio conjunto mina-planta.

*Tabla 15: Configuración óptima malla-explosivo*

<b>Combinación malla-explosivo que maximiza el beneficio neto</b>		
Clasificación del terreno	Fase 2	Fase 3
Roca sana	Malla 6x7 [mxm] y Emultex	Malla 7x8 [mxm] y Emultex
Caving	Malla 5,5x6,5 [mxm] y Emultex	
Borde	Malla 5,5x6,5 [mxm] y Emultex	Malla 6X7 [mxm] y Emultex

En la siguiente tabla se muestra el factor de carga óptimo en cada caso. Hay que hacer hincapié en que se debe cumplir el factor de carga tanto a nivel local como a nivel global.

*Tabla 16: Factor de carga óptimo*

Clasificación del terreno	Factor de carga Fase 2 [grs/ton]	Factor de carga Fase 3 [grs/ton]
Roca sana	410	307
Caving	481	
Borde	481	410

Para estimar qué tan alejada se encuentra la configuración propuesta con respecto a la práctica actual en la mina, se comparó el factor de carga propuesto con el utilizado en cada pozo para los 13 disparos. En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de pozos por disparo que cumplen con las exigencias establecidas en este estudio, utilizando para ello tolerancias del 5, 10, 15 y 20% (ver figura 88).

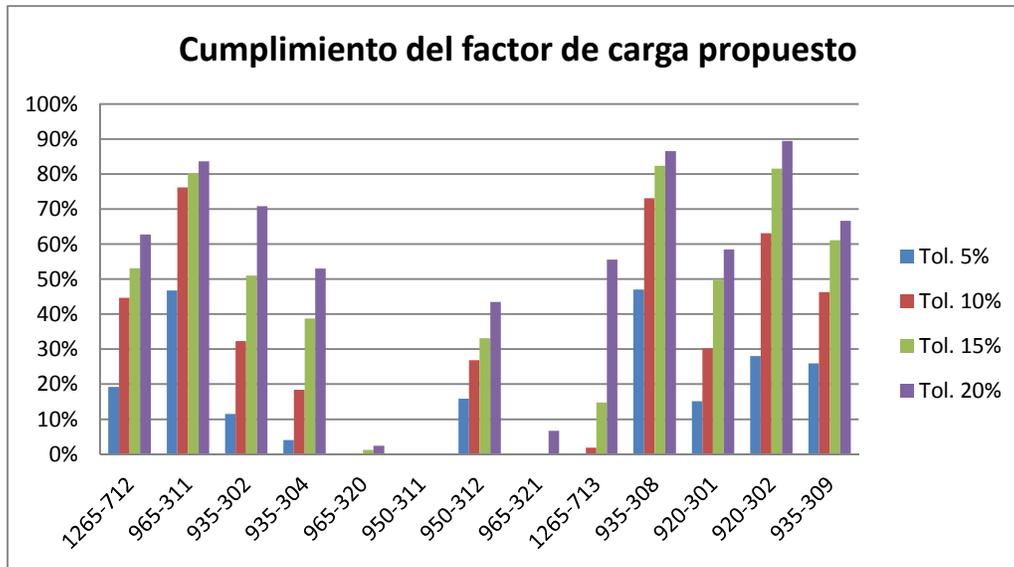


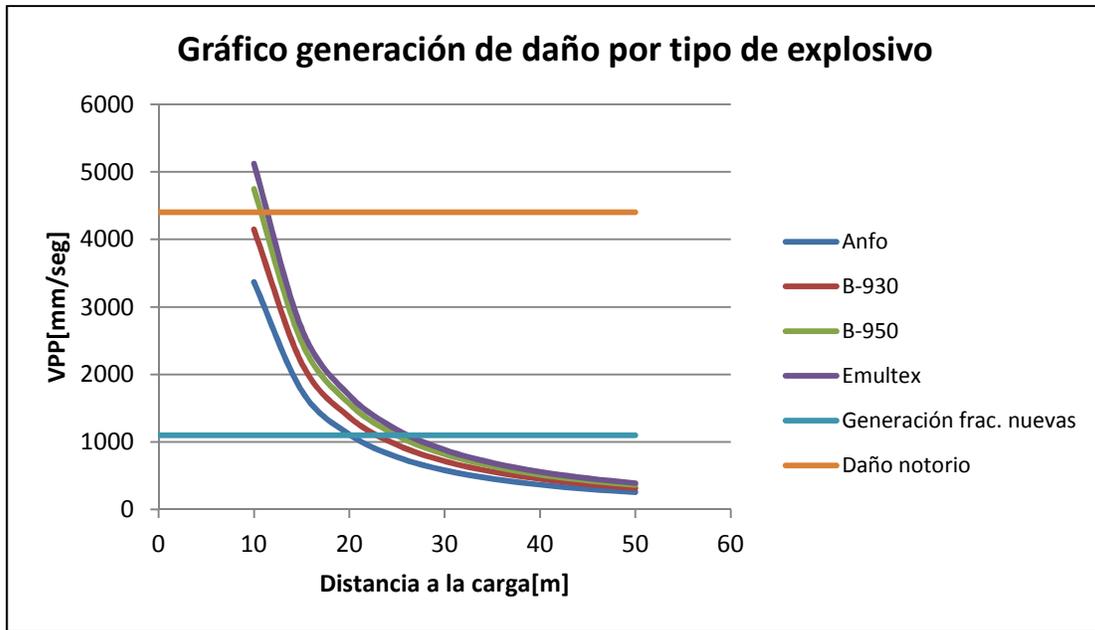
Figura 88: Porcentaje de pozos que cumplen con el factor de carga propuesto

#### 5.4 Influencia del diseño propuesto

Para cumplir con los objetivos de fragmentación se propone aumentar el factor de carga, con lo cual se podrían eventualmente dañar las paredes finales del rajo. Si bien es cierto que actualmente se tiene una alta variabilidad en el factor de carga, que en ciertas ocasiones supera el valor máximo de 481 [grs/ton], el promedio es menor a lo propuesto.

Dado lo anterior, se realizó una simulación de “campo lejano” usando el modelo USBM, donde se mide el daño que produce cada explosivo en función de la velocidad peak de las partículas (VPP), que a su vez es función de la distancia a la carga. En la figura 89 se pueden observar dos límites, uno que representa la generación de nuevas fracturas y el otro que representa la generación de un daño notorio. Para el caso del Anfo, la generación de nuevas fracturas ocurre a una distancia a la carga de 21 [m] y la generación de un daño notorio a una distancia de 9 [m]. En el caso del Emultex, se presenta una generación de nuevas fracturas a los 27 [m] y una generación de daño notorio a los 12 [m].

Resumiendo, existen diferencias en la generación de daño al comparar el Anfo con el Emultex, pero no se notan grandes diferencias entre el Emultex y la situación actual en la mina (una combinación entre Blendex-930 y Blendex-950). Por lo tanto, no existe evidencia geomecánica en este sentido para descartar el uso de Emultex.



*Figura 89: Simulación del daño producido por tipo de explosivo utilizado*

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la mina el año recién pasado se gastaron en perforación y tronadura 29 [MUS\$]. Con las configuraciones propuestas se estima un gasto anual de 34 [MUS\$], que se encuentra cercano al programa de la mina.

Se recomienda usar Emultex, debido a su alto poder rompedor y al gran volumen de gases que produce. Además, con ello se elimina la complicación de cambiar el explosivo debido a la presencia de agua. Por ejemplo, si se utiliza Blendex-930 sin percatarse de la presencia de agua, se generan gases nitrosos producto de una reacción química incompleta; además, la energía aportada por el explosivo disminuye notablemente.

El estudio permitió concluir que los mejores resultados granulométricos post-tronadura en la zona de caving se logran con mallas de 5x5 [mxm] usando Blendex-930, pero esta configuración no corresponde al óptimo económico, cabe destacar que esta malla se usó como prueba en 2 disparos.

La litología es una variable relevante dentro del proceso de perforación y tronadura, en especial la Toba Brechosa que presenta inconvenientes adicionales, pero su estimación a priori es compleja, por lo que se propone utilizar la vpi de la perforadora d-75 y la DMM para estimar la presencia de dicha litología; así cuando el rendimiento (vpi) de estas perforadoras sea inferior a 23 [m/hr], se propone usar un diseño alternativo. El diseño alternativo debe ser propuesto por la superintendencia de perforación y tronadura en conjunto con el personal técnico de Enaex y debe considerar el aumento del factor de carga utilizando un explosivo más energético que el emultex, así como también se debe considerar el uso de retardos entre pozos que ayuden al proceso de fragmentación de la roca, (retardos menores a 7 [mseg], revisar el estudio de retardos en anexos). Dichos retardos deben ser implementados teniendo en consideración no sobrepasar las restricciones ambientales.

El aumento del factor de carga en presencia de litologías complicadas no debe obtenerse en desmedro de la disminución del taco, ya que esta variable es importante para la maximización energética de la tronadura (ver anexos).

La recomendación de los geomecánicos de la mina es no sobrepasar los 420 [grs/ton] como factor de carga, pero también es cierto que dentro de los disparos analizados hubo un porcentaje no despreciable de pozos que sobrepasaron los 500 [grs/ton]. Actualmente (Enero-Febrero 2013), se están realizando pruebas de campo cercano y lejano, que darán el sustento geomecánico al diseño propuesto en cada sector.

La aplicación de una malla de perforación y un tipo de explosivo no asegura un cierto factor de carga en el macizo rocoso, lo que hace necesario un mayor control en terreno. El control del factor de carga debe realizarse tanto a nivel global como por pozo.

El rendimiento efectivo de las palas en la Fase 3, para un D80 dado, es mayor que su rendimiento en la Fase 2, lo que justifica el uso de mallas más amplias en la Fase 3.

En este estudio no se consideraron los costos de la reducción secundaria asociada al sobretamaño, ni tampoco los costos asociados al tiempo perdido. Un ejemplo claro corresponde al disparo 950-312, el cual demoró 32 días en ser extraído, lo que en condiciones normales demoraría alrededor de 4 días. Lo anterior repercute directamente en la planificación a corto plazo de la mina.

Con el propósito de eliminar los gases nitrosos en los sectores de caving en Fase 2, la superintendencia de perforación y tronadura, en conjunto con el personal técnico de Enaex, implementaron algunas alternativas de diseño en el proceso de tronadura. Una de las cuales fue la utilización de mangas de plástico para sellar el pozo y así aumentar el confinamiento del explosivo, en este caso se utilizó una malla de 7x8 [mxm] y Anfo. La otra innovación utilizada fue el aireamiento del explosivo, con el propósito de aumentar la cantidad de oxígeno dentro del pozo para facilitar así la generación de “puntos calientes” y lograr una detonación estable. Se midió el respectivo resultado granulométrico de ambas alternativas. Para el caso de la utilización de mangas y a pesar del bajo factor de carga utilizado, el D80 estuvo cercano al promedio de la mina. Por lo tanto se recomienda estudiar a fondo esta alternativa, ya que los costos tanto de perforación como de tronadura bajan considerablemente con respecto a cualquier otra configuración malla-explosivo. Con respecto a la segunda propuesta, no se observó una variación en la granulometría.

El acopio recibe un tonelaje significativo de la mina, con cuya capacidad se puede alimentar el chancador con plena autonomía durante algunos turnos en caso de ser necesario (principalmente debido a problemas climáticos). Generalmente durante un turno, el chancador es alimentado tanto por la mina, como por el acopio en un grado menor. Es por lo anterior que un buen producto granulométrico obtenido de la mina, que al mezclarse con el material del acopio, y sumando la segregación por tamaños, pierde su configuración original, por lo que el concepto “mine to mil” en El Soldado no tiene sentido si no se realizan los respectivos análisis periódicos de leyes y de granulometría en el acopio. Específicamente se propone dividirlo por sectores granulométricos, cuantificando exactamente la curva granulométrica extraída que alimenta al chancador.

En este trabajo se realizó un estudio “mine to mil”, pero centrado principalmente en la mina. Se recomienda realizar un estudio detallado de la incidencia de la granulometría en el rendimiento de la planta, y las principales variables que afectan este proceso, con lo cual el análisis económico será más preciso. Una de las variables importantes que no se estudió, es el work index, se recomienda cuantificar su dependencia con las variables de diseño de la perforación y tronadura y su incidencia en el rendimiento de la molienda.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Azolas Alvaro; “Aumento de tonelaje de la molienda SAG mediante modificaciones en la operación minera”, División El Soldado, Anglo American, memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, U. de Chile, 2005.

[2] Díaz Gonzalo; “Estudio de las variables Mina-Planta y su incidencia en el tratamiento horario en molinos SAG”, División Los Bronces, Anglo American, memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, U. de Chile, 2004.

[3] Olea Juan, Zúñiga Alonso; “Análisis granulométrico Fase 2 en mina El Soldado Anglo American Chile”, Informe técnico preparado por ingenieros de Enaex para la Superintendencia de perforación y tronadura de la mina El Soldado, 2012.

[4] Retamales Miguel; “Simulación y validación de tronaduras mediante análisis granulométrico en proceso mine to mill”, División El Soldado, Anglo American, memoria para optar al título de ingeniero civil en minas, U. de Santiago, 2008.

[5] Sánchez Gerardo; “Análisis geotécnico para la estimación de la fragmentación en tronaduras en minas a rajo abierto, mina Chuquicamata”, memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, U. de Chile, 2002.

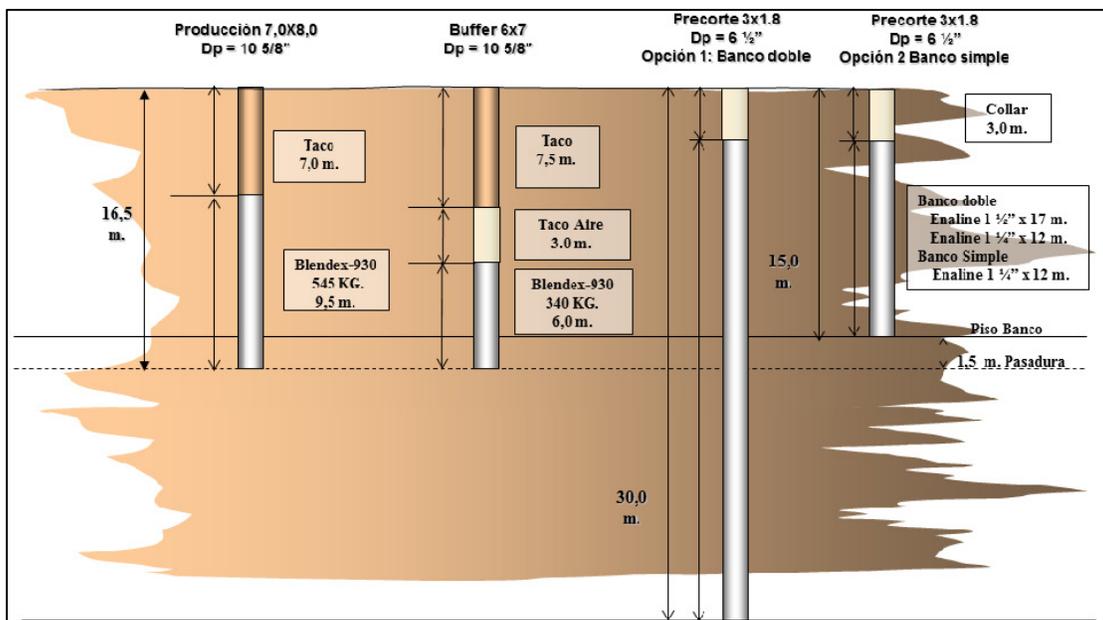
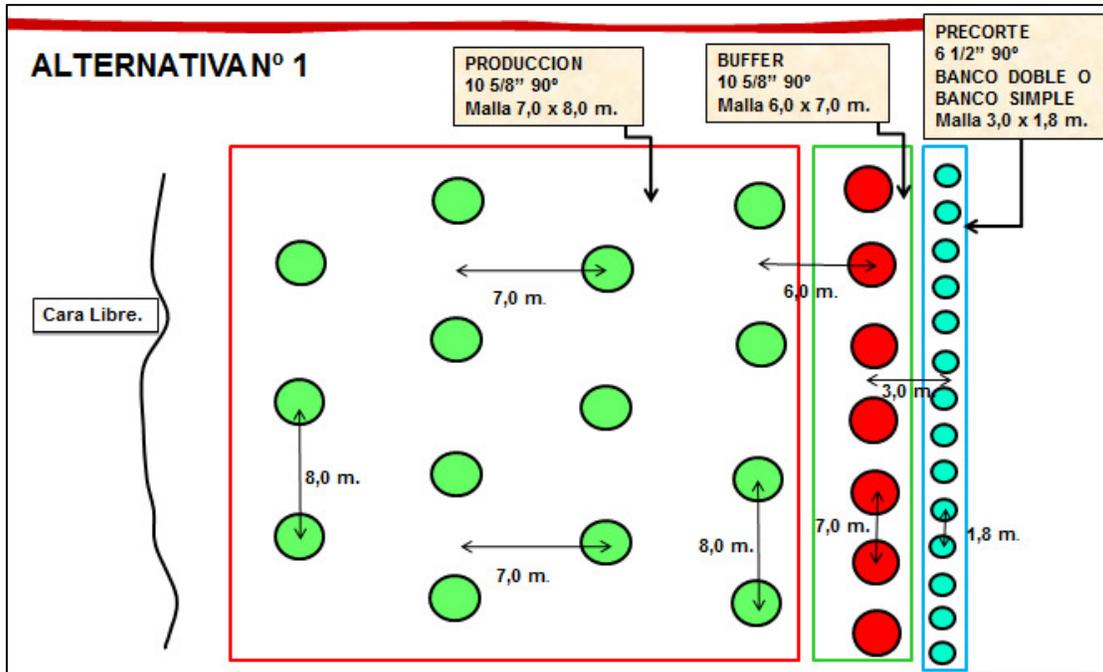
[6] Salas Cristian; “Predicción granulométrica en tronadura y su incidencia en el proceso productivo, mina El Soldado Anglo American”, memoria para optar al título de ingeniero civil de minas, U. de Chile, 2005.

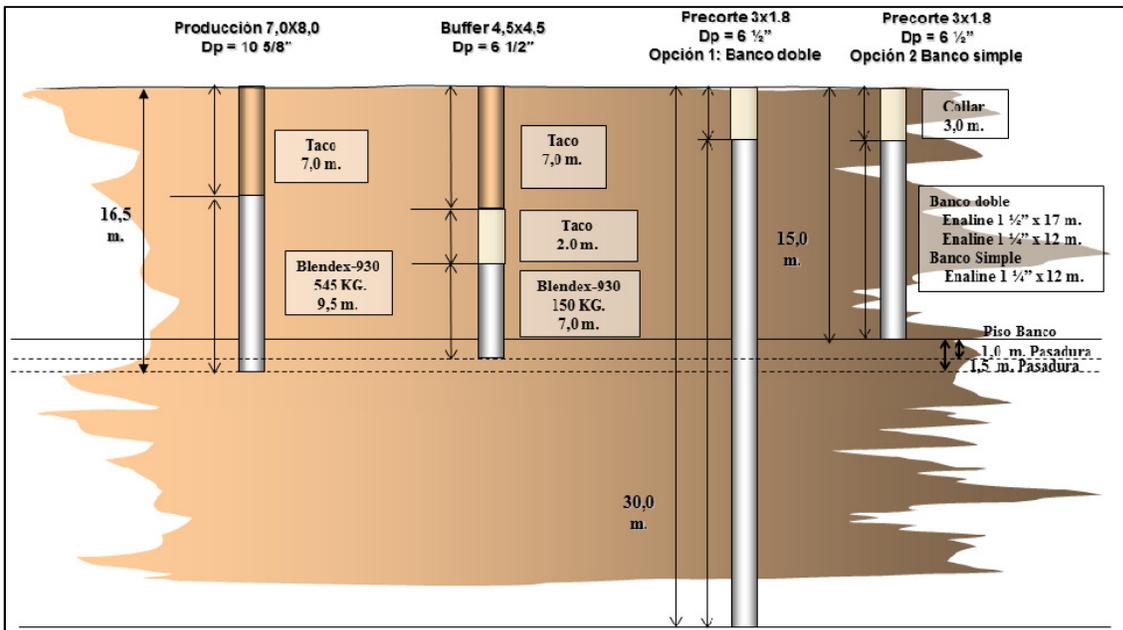
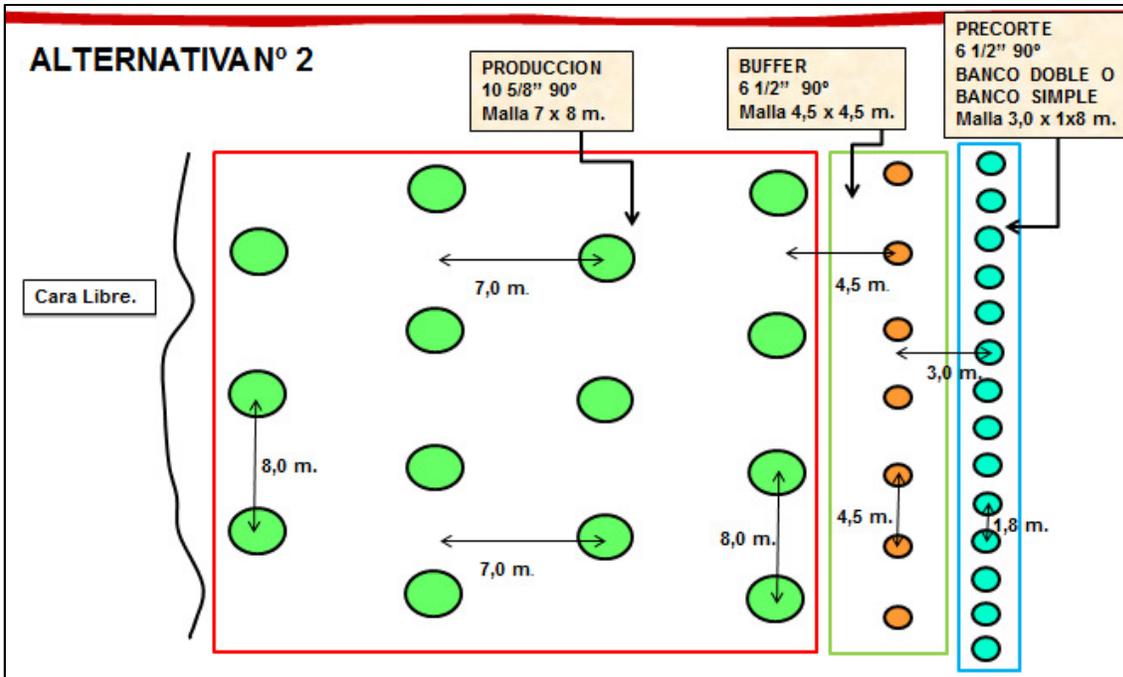
# ANEXOS

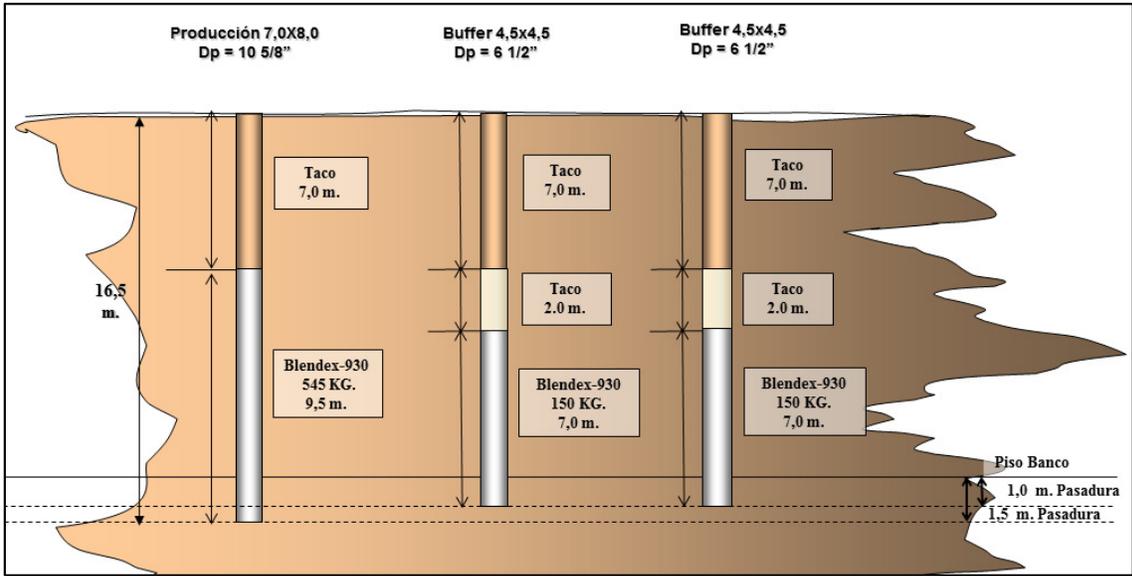
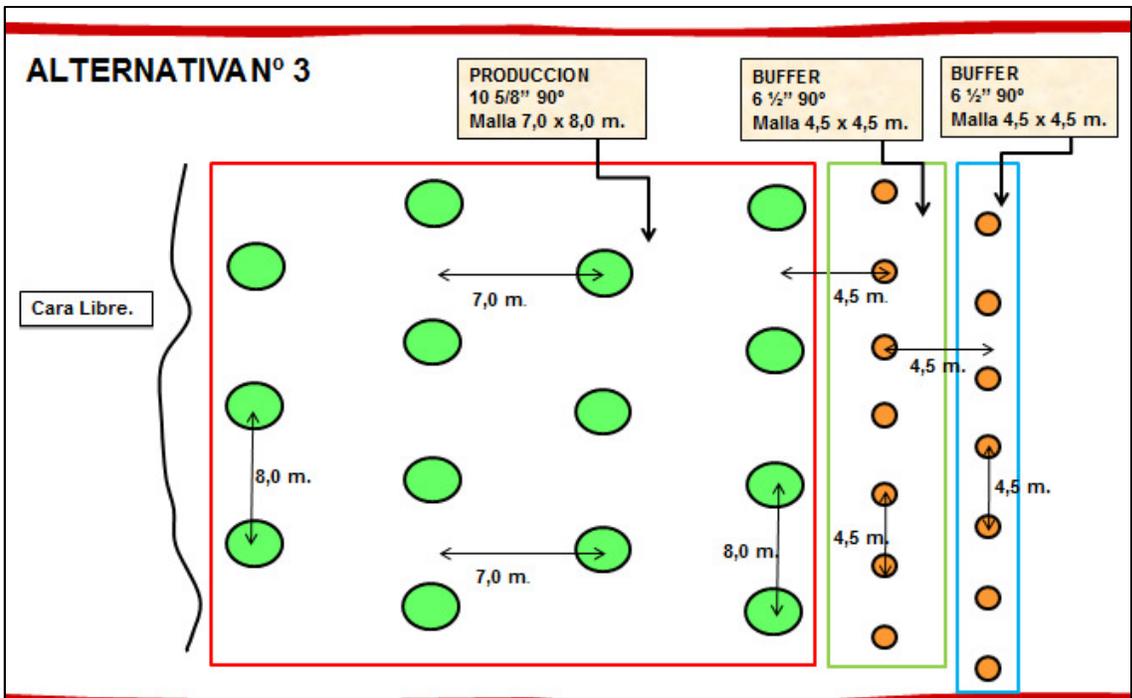
## Dominio de Perforación y tronadura en Fase 2 y Fase 3

### 1. Zona de roca sana

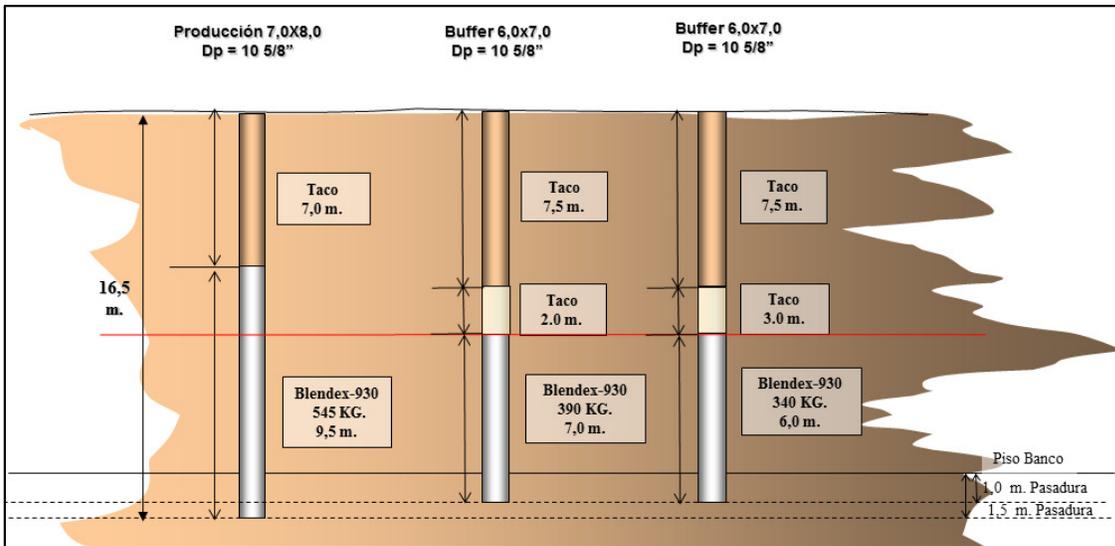
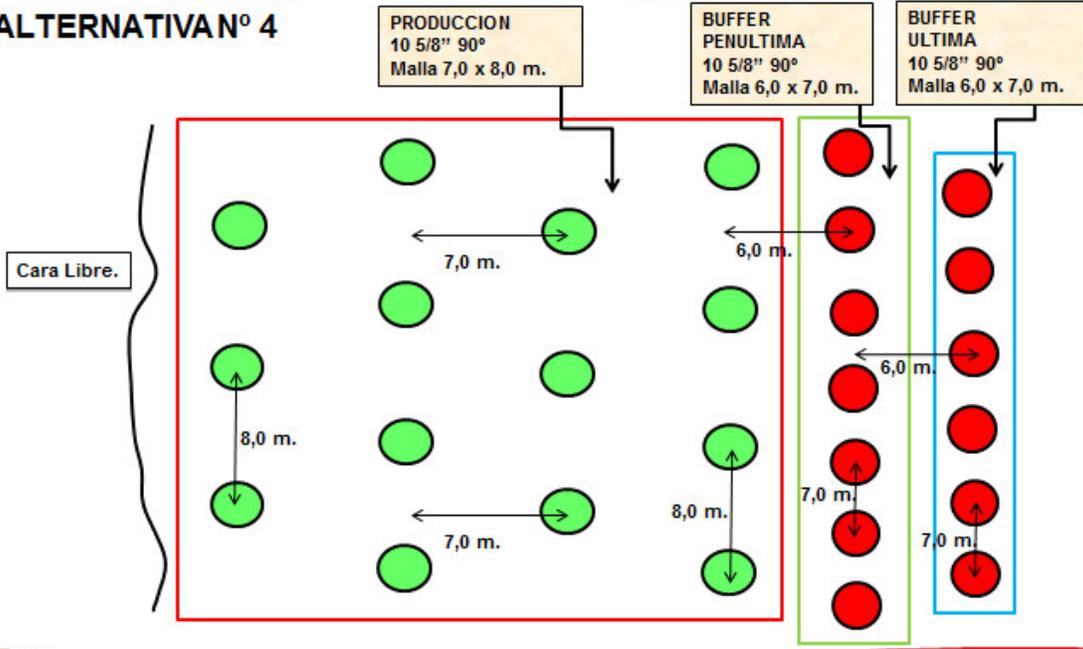
A continuación se presentan las 5 alternativas de esta categoría.

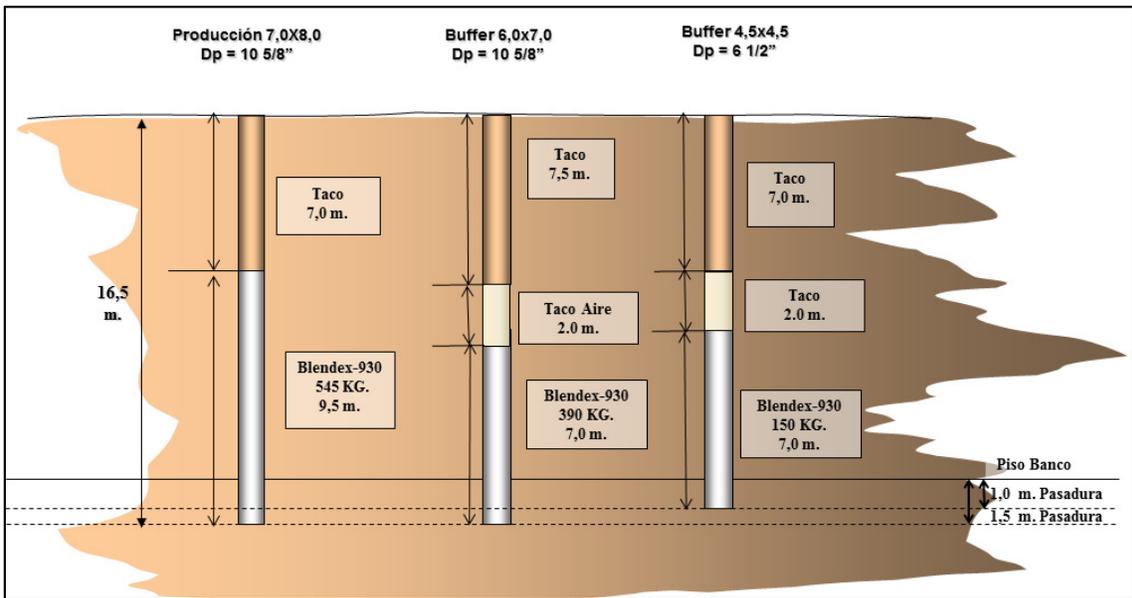
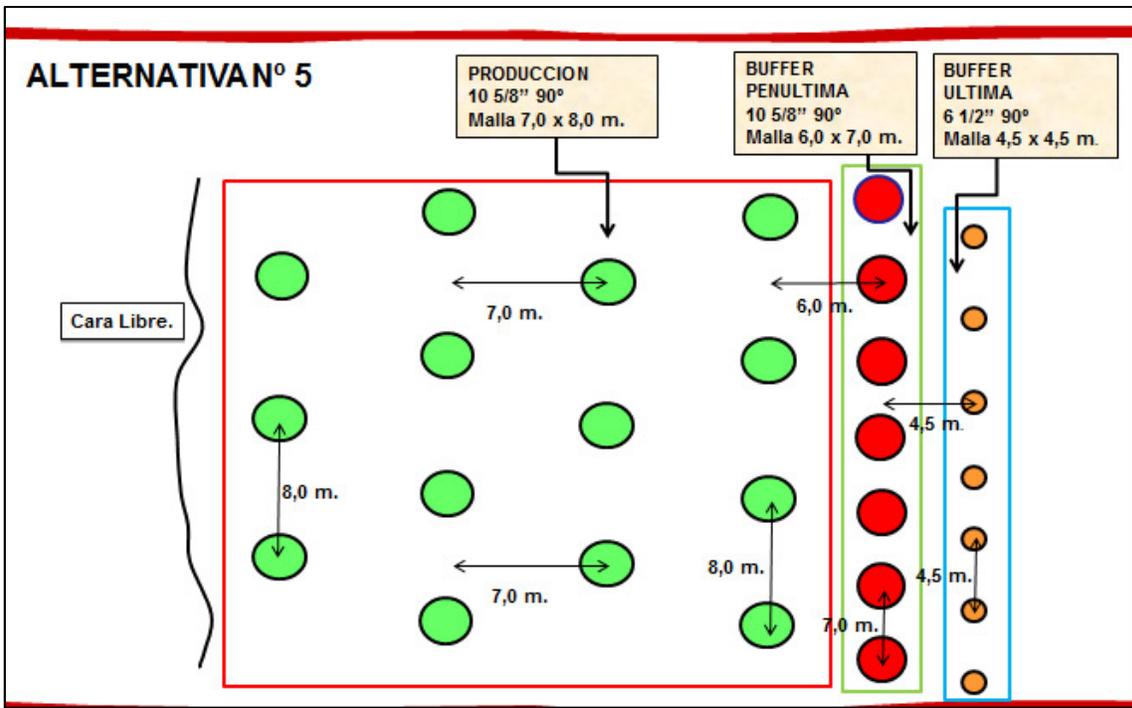




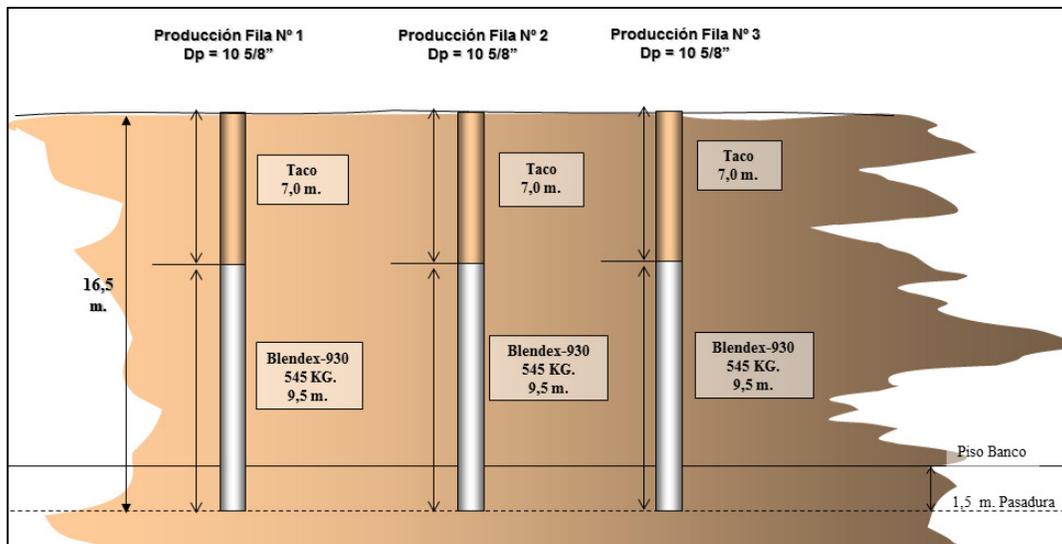
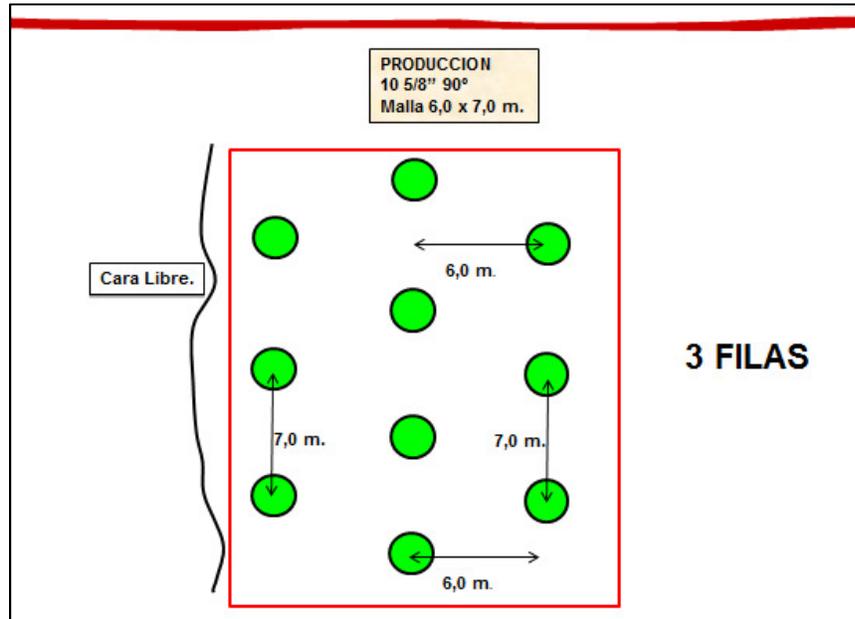


# ALTERNATIVA N° 4

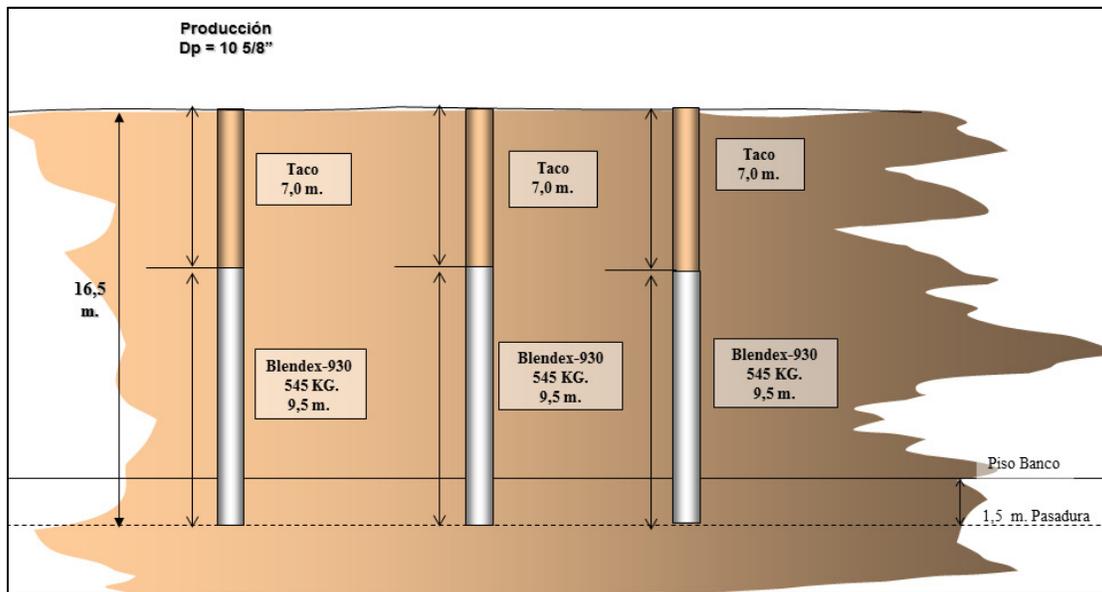
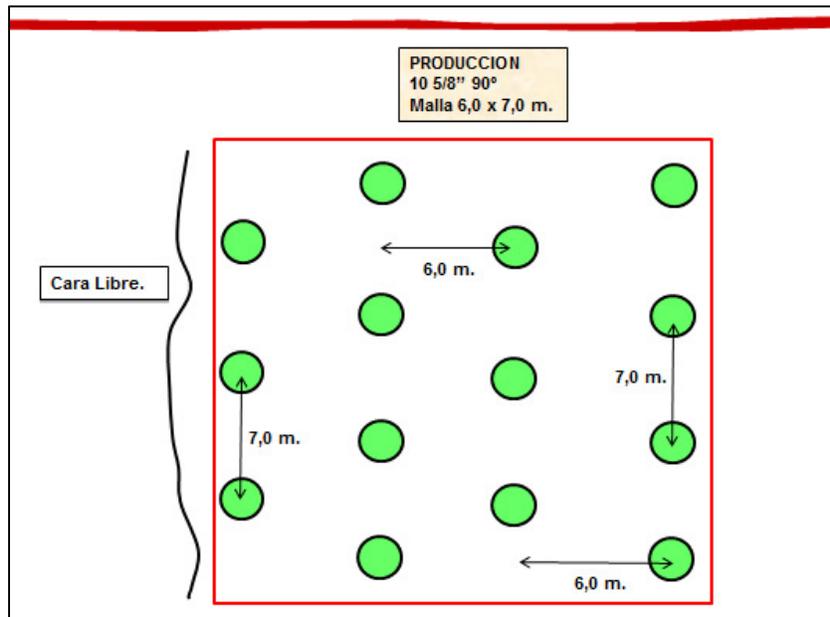




2. Zona de Borde



### 3. Zona de Cavidades



### **Influencia de la litología en la velocidad de perforación instantánea (vpi)**

En este estudio se obtiene la vpi de cada pozo, teniendo en consideración el tipo de perforadora ocupada, agrupándose los datos por litología, dando como resultado la siguiente tabla. Se concluye que sólo las perforadoras d-75 y las DMM, poseen un rendimiento de perforación dependiente de la litología, en contraste la perforadora P-V presenta un rendimiento constante en cada sector.

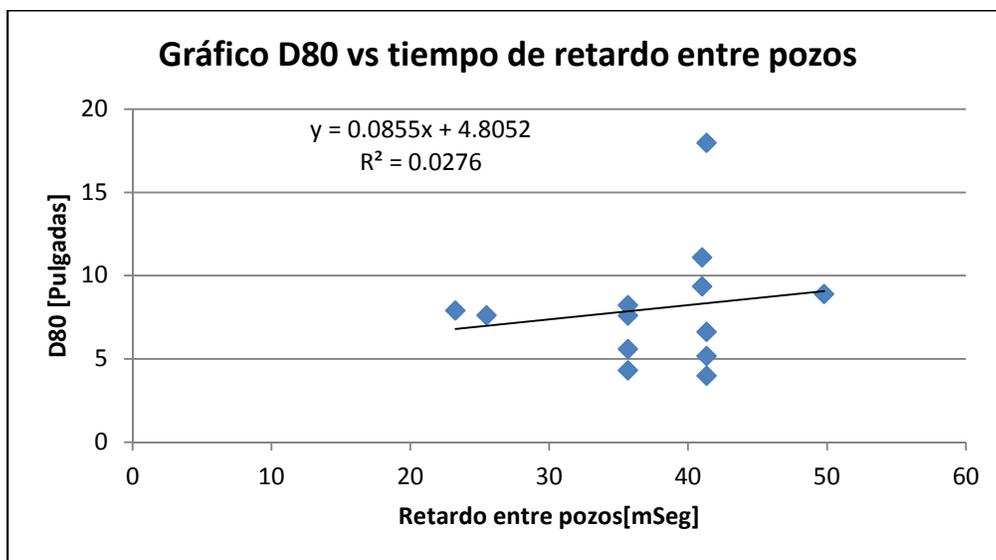
El estudio consideró más de 800 pozos, por lo que la tendencia es clara y se mantiene en cada disparo.

	Rendimiento efectivo Perforadoras [m/hr]			
Litología	<b>d-75</b>	<b>DMM</b>	<b>P-V</b>	<b>Promedio d-75/DMM</b>
Veta Negra	36,3			36,3
Traquita	29,9	37,36		33,6
Andesita	23,8	27,74	32,5	25,8
Toba Brechosa	19,9	20,43	32,7	20,2

### Influencia del tiempo de retardo en la granulometría

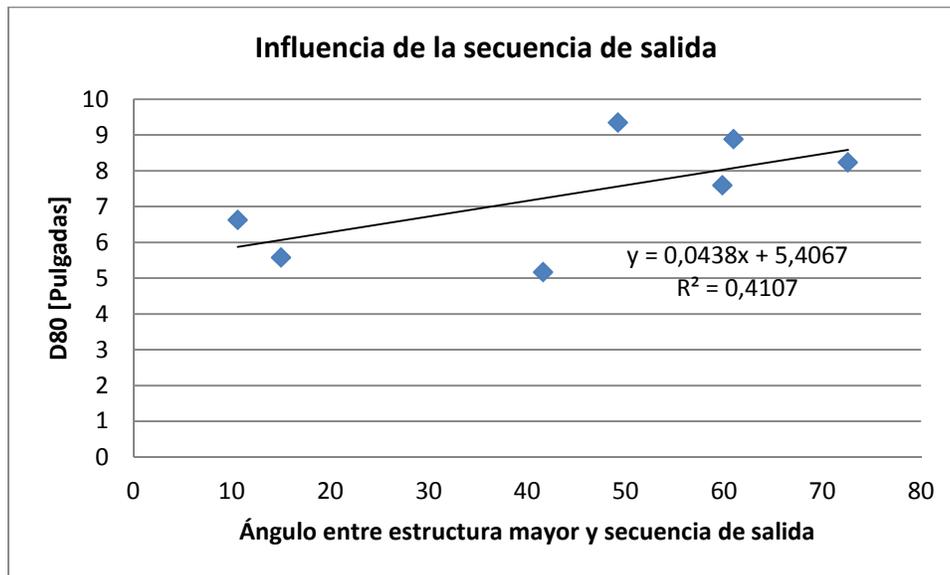
En este estudio se analizó sólo el tiempo de retardo entre pozos, ya que el tiempo de retardo entre filas influye en el desplazamiento de la pila, pero no en la reducción de tamaños. Para el análisis, se tomó el tiempo de retardo promedio del disparo, el cual se mueve entre los 22 y los 50 milisegundos.

Se concluye que la influencia del tiempo entre pozos es mínima y errática para intervalos pequeños de tiempo de retardo (ver el gráfico). Según la mayoría de los estudios al respecto, la influencia de esta variable es relevante sólo en intervalos extensos, por ejemplo en la comparación de retardos entre 3 y 70 [mSeg].



### Influencia de la secuencia de salida en la granulometría

Se estudió la secuencia de salida con respecto al ángulo que forma con las estructuras mayores, se obtiene una tendencia contraria a lo que se esperaba, es decir, que la granulometría sea mínima cuando las líneas de isotiempo cortan de forma perpendicular a la estructura (90°). Lo anterior hace pensar que la familia de estructuras menores (perpendiculares a las mayores), son las dominantes del proceso. Actualmente en la mina no se puede comprobar lo dicho anteriormente, ya que el mapeo por disparo es ocasional. Se recomienda estudiar esta variable.



### Influencia del taco en la granulometría

Se estudian disparos tanto de la Fase 2 como de la Fase 3, el resultado granulométrico se estima en función del rendimiento efectivo de las palas y de los videos de la tronadura. Para cada disparo se compara el diseño del taco propuesto y el real, con ello se concluye que el taco usado actualmente en la faena es el necesario para obtener los resultados propuestos, pero no es el óptimo, ya que de los videos se observa el escape de un gran volumen de gases. Además se concluye que no se debe disminuir el taco con el afán de aumentar el factor de carga.

#### Fase 2

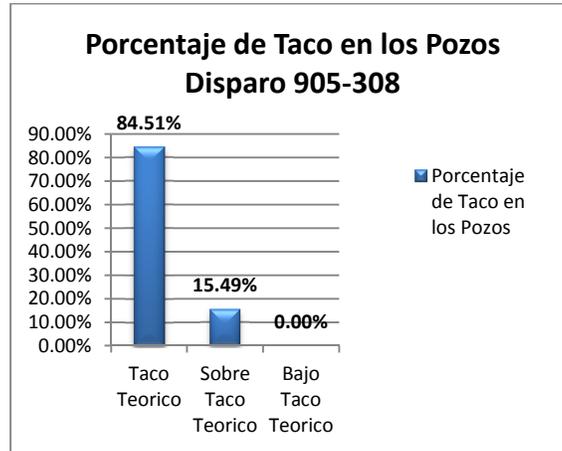
Disparo	N° Pala	Rend. Efectivo	Porcentaje Rend.
905-308	PALPC02	2542	112,53
	PALPC03	2893	128,07
890-301	PALPC05	2165	95,84
	PALPC07	3025	97,58
890-302	PALPC05	2721	120,45
	PALPC07	3540	114,19
890-303	PALPC07	3507	113,13
890-304	PALPC07	3213	103,65
890-306	PALPC03	2224	98,45
	PALPC07	2904	93,68
890-307	PALPC03	2580	114,21
	PALPC07	2904	93,68
890-308	PALPC07	3338	107,68

#### Fase 3

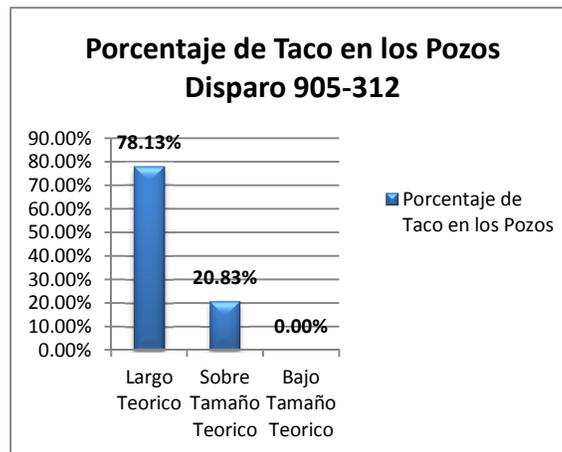
Disparo	N° Pala	Rend. Efectivo	Porcentaje Rend.
1250-708	PALPC06	1388	61,44
1250-713	PALPC05	2396	106,06
	PALPC06	2513	111,24
1250-714	PALPC05	2390	105,80
	PALPC06	1779	78,75
1235-703	PALPC02	2579	114,17
1250-716	PALPC06	2774	122,80
1250-717	PALPC06	2248	99,51
1250-706	PALPC06	2101	93,01
1250-720	PALPC06	3022	133,78

Fase 2:

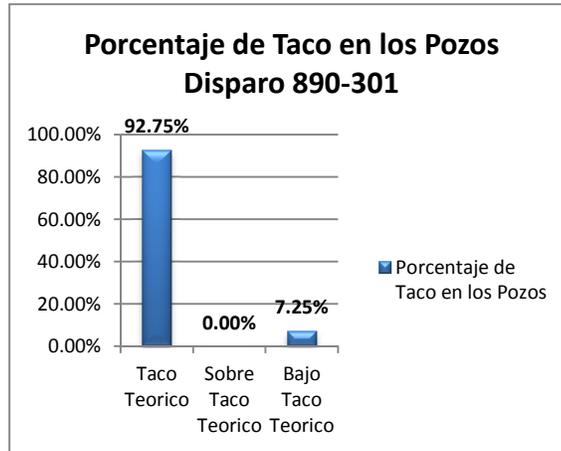
- 905-308 Fecha: 10/01/2013



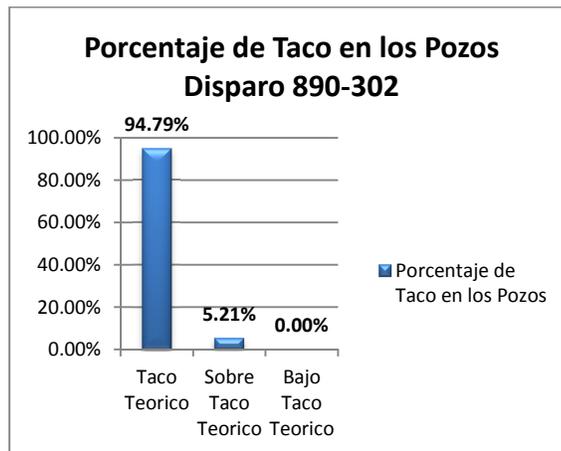
- 905-312 Fecha: 14/01/2013



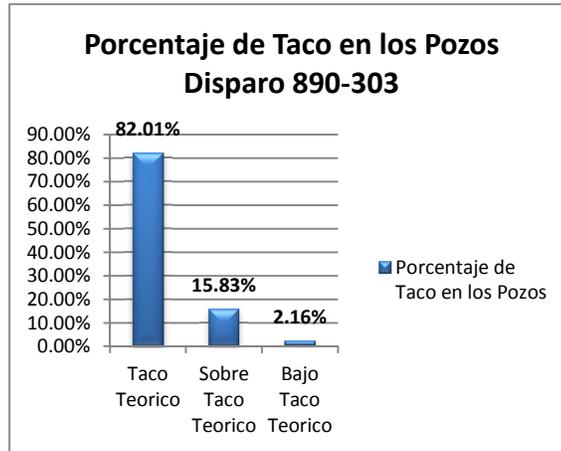
- 890-301 Fecha: 18/01/2013



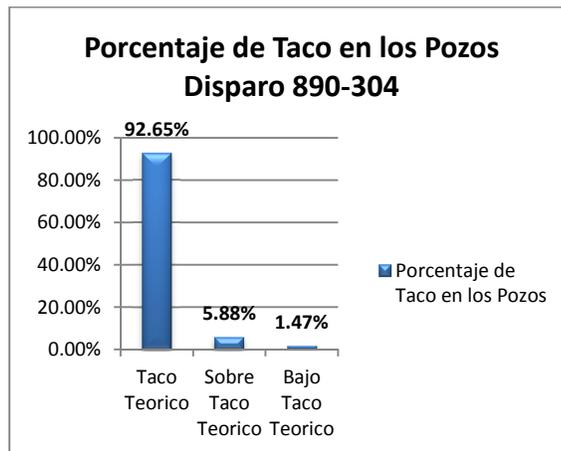
- 890-302 Fecha: 18/01/2013



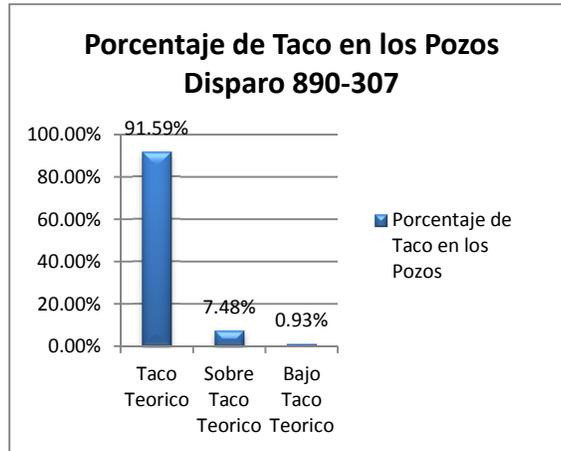
- 890-303 Fecha: 26/01/2013



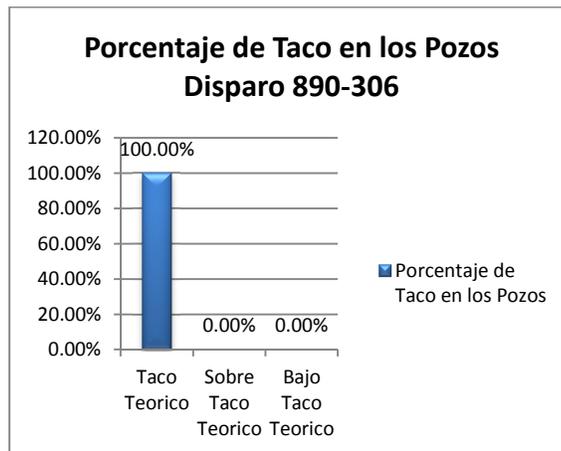
- 890-304 Fecha: 30/01/2013



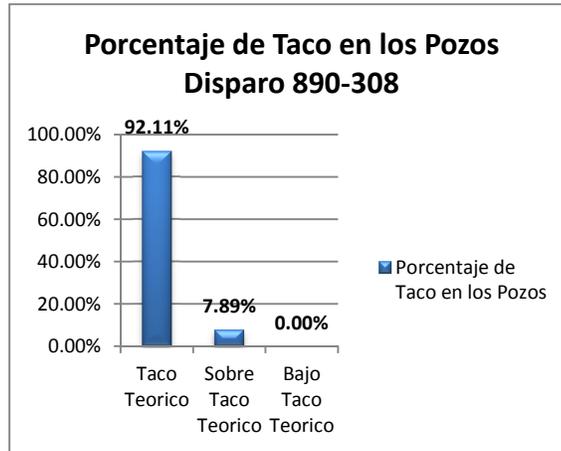
- 890-307 Fecha: 02/02/2013



- 890-306 Fecha: 05/02/2013

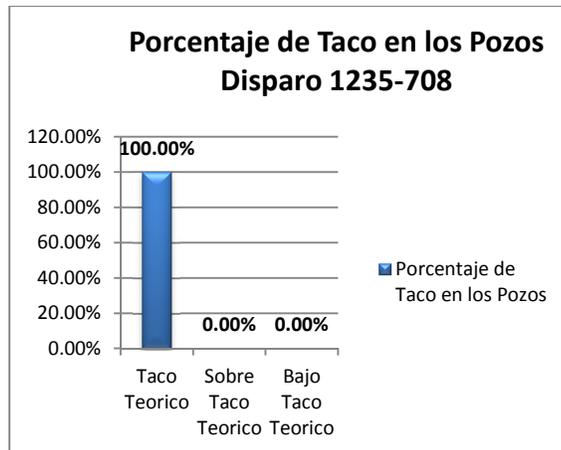


- 890-308 Fecha: 09/02/2013

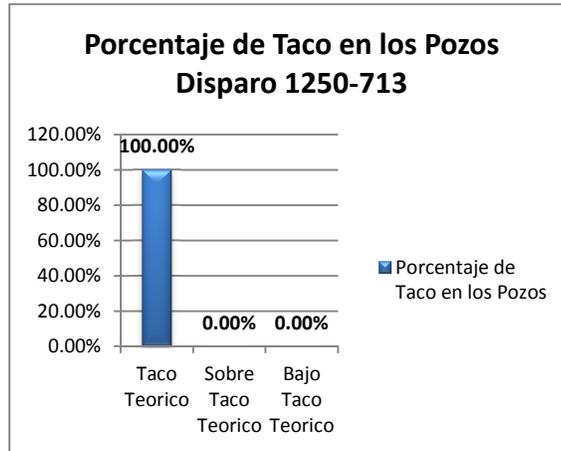


Ahora se presentaran los gráficos obtenidos de Fase 3:

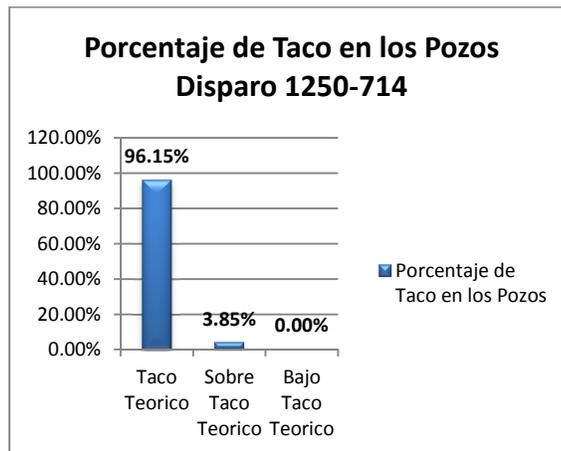
- 1235-708 Fecha: 16/01/2013



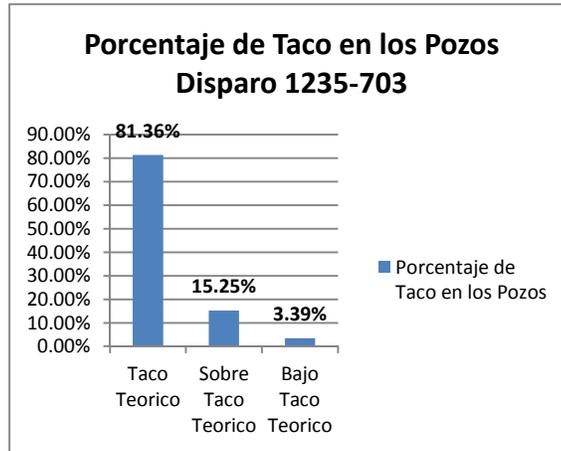
- 1250-713 Fecha: 18/01/2013



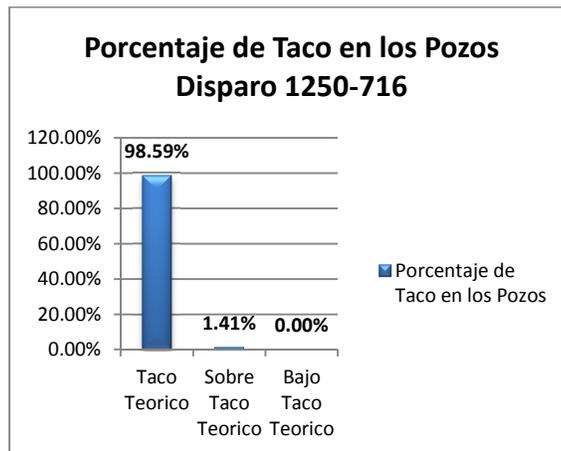
- 1250-714 Fecha: 22/01/2013



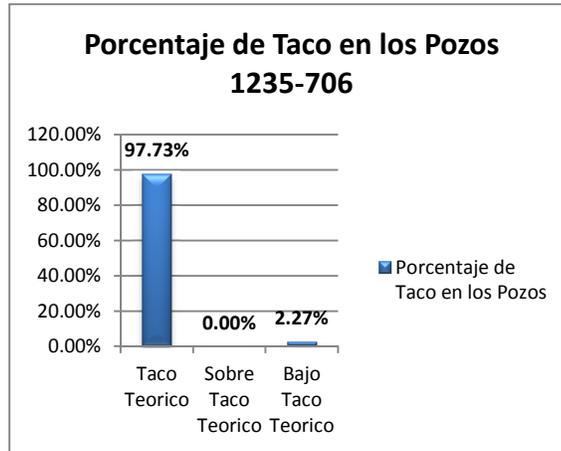
- 1235-703 Fecha: 28/01/2013



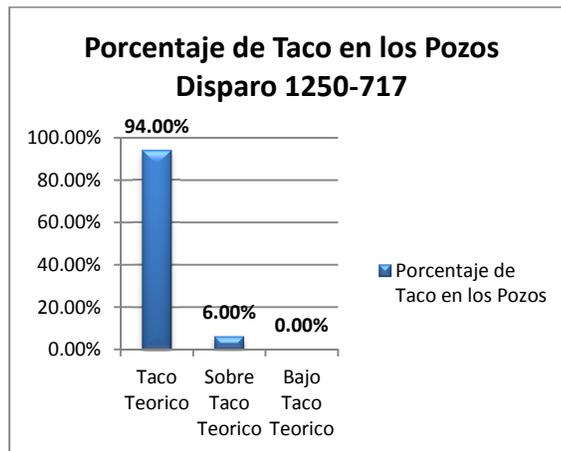
- 1250-716 Fecha: 30/01/2013



- 1235-706 Fecha: 01/02/2013



- 1250-717 Fecha: 04/02/2013



- 1250-720 Fecha: 09/02/2013

