

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA



**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA EMULSIÓN
GASIFICADA EN MINERA YANACOCCHA SRL**

TESIS

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

PRESENTADO POR:

EDSON EDU SALCEDO ORIHUELA

ASESOR:

ING. AUGUSTO TEVES ROJAS

Lima – Perú

Noviembre - 2015

AGRADECIMIENTO

A la gloriosa Universidad Nacional de Ingeniería y a todos los catedráticos que formaron en mí pensamiento crítico y desarrollaron la continua búsqueda de la innovación.

Al Equipo de Seguridad y Rescate Minero, quienes enseñan con la práctica la importancia verdadera de un equipo y demuestran los vínculos familiares que se forman dentro de él.

Al Ing. Tulio Antezano, quien siempre está mostrándome el camino correcto para mi desarrollo personal y profesional.

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a mi madre, que con su trabajo y dedicación inculcaron en mí deseos de superación y tenacidad, enseñándome a abrir caminos diversos ante toda adversidad.

Dedico también este trabajo a mi esposa y hermana, que siempre están apoyándome en cada reto asumido.

INDICE

AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA	ii
INDICE	iii
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. DESCRIPCIÓN DE MINERA YANACOCHA	4
1.1. Ubicación y accesibilidad	4
1.2. Clima.....	4
1.4. Marco geológico regional	7
1.5. geología estructural, litología y alteraciones	9
1.5.1. Geología estructural.....	9

1.5.2. Litología	11
1.5.3. Alteraciones	12
1.6. Operación en la mina.....	16
CAPITULO II. PERFORACIÓN Y VOLADURA	18
2.1. Equipos de perforación presupuestados	18
2.2. Diseño de mallas de perforación	20
2.3. Explosivos disponibles y su aplicación.....	24
2.3.1. Explosivos primarios.....	24
2.3.1.1. Detonadores electrónicos.....	24
2.3.1.2. Detonadores no eléctricos (Nonel)	25
2.3.2. Explosivos Secundarios.....	26
2.3.3. Agentes de voladura.....	26
2.3.3.1. ANFO (Amonium Nitrate Fuel Oil).....	26
2.3.3.2. Emulsión.....	29
2.3.3.2.1. Emulsión TC.....	30
2.3.3.2.2. Emulsión Gasificada	32
2.3.3.3. ANFO pesado	34
2.3.4. Características de los explosivos.....	37
2.4. Diseño de cargas explosivas y secuencia de disparo	41
CAPITULO III. EMULSIÓN GASIFICADA.....	47

3.1. Introducción.....	47
3.2. Estabilidad de las emulsiones.....	49
3.3. Productos de la emulsión explosiva y calores de formación.....	50
3.4. Balance de oxígeno y calor de explosión	50
3.5. Reacción química en la emulsión gasificada	53
3.6. Características técnicas de la emulsión gasificada.....	54
3.7. Sistema de inyección de nitrito de sodio	55
CAPITULO IV. EVALUACIÓN TÉCNICA.....	59
4.1. Efecto de la presión hidrostática en la columna explosiva	59
4.2. La velocidad de detonación para la emulsión G	61
4.3. Comparación técnica entre anfo pesado y emulsión G.....	63
4.4. Resultados de tasas de excavación	65
4.5. Análisis de fragmentación comparativo	67
CAPITULO V. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	72
5.1. Precio de agentes y accesorios de voladura.....	72
5.2. Comparativo de costos por taladro	73
5.3. Análisis de sensibilidad	80
5.3.1. Densidad equivalente.....	80
5.3.2. Altura de carga equivalente.....	81
CAPITULO VI. BENEFICIOS ECONÓMICOS	83

6.1. Aspectos generales	83
6.2. Proyección de minado y consumo de explosivo	84
6.3. Proyección del ahorro estimado	85
6.4. Resultados de consumos de agentes de voladura y KPI de control.....	86
6.5. Valor presente neto del proyecto	89
CONCLUSIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS.....	95
ANEXO 01.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Alteraciones litológicas en MYSRL	16
Tabla 2. Especificación técnica de las perforadoras en MYSRL.....	19
Tabla 3. Ficha técnica de detonadores electrónicos.....	25
Tabla 4. Ficha técnica de la emulsión TC (a granel)	31
Tabla 5. Ficha técnica de la emulsión G.....	34
Tabla 6. Rangos de VOD para taladros de 10 5/8''	39
Tabla 7. Secuencia lógica para el diseño de cargas explosivas	41
Tabla 8. "Cookbook" de mallas de perforación para el 2015.....	45
Tabla 9. Componentes, calores de formación y balance de oxígeno de la emulsión gasificada.....	50
Tabla 10. Balance de oxígeno ideal	51
Tabla 11. Balance de oxígeno de la emulsión y calores de explosión para diferentes proporciones de los componentes base.	52
Tabla 12. Características técnicas de la emulsión G de EXSA	55
Tabla 13. Densidad final de taza para la emulsión G y VOD equivalentes al ANFO pesado.	63

Tabla 14. Comparación cualitativa de la emulsión G y el ANFO pesado.	64
Tabla 15. Precios unitarios de agentes de voladura.....	73
Tabla 16. Precios unitarios de accesorios y explosivos primarios.....	73
Tabla 17. Altura de carga equivalente entre emulsión G y ANFO pesado.....	82
Tabla 18. Ahorro por taladro para cada tipo de mezcla equivalente.....	83
Tabla 19. Densidades para la emulsión G y su equivalente en ANFO pesado	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación Geográfica del Distrito Minero de Yanacocha y su relación con las unidades geológicas y sistemas estructurales	5
Figura 2. Plano geológico del Distrito Minero de Yanacocha.....	7
Figura 3. Plano con las estructuras principales del Distrito Minero de Yanacocha .	10
Figura 4. Depósitos de mineralización	12
Figura 5. Columna estratigráfica del complejo volcánico de Yanacocha.....	13
Figura 6. Plano de Alteraciones Hidrotermales en el Distrito de Yanacocha.....	15
Figura 7. Equipos de perforación presupuestados.	18
Figura 8. Diagrama de flujo para el diseño de mallas de perforación.....	21
Figura 9. Influencia del porcentaje de combustible en el ANFO	28
Figura 10.- Efecto del agua en taladros cargados con ANFO.	28
Figura 11.- Vista microscópica de la emulsión	29
Figura 12. Medición de la densidad inicial en taza de la emulsión G.....	32
Figura 13. Medición de la densidad final luego de 20 min.	33
Figura 14. Burbujas de nitrógeno en la emulsión G	34
Figura 15. Estructura del ANFO pesado.....	35

Figura 16. Variación de las propiedades del ANFO pesado con respecto al porcentaje de sus componentes.	36
Figura 17. Variación de la potencia y densidad de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión.	37
Figura 18. Variación de densidad respecto a altura de carga.	40
Figura 19. Ubicación del proyecto a ser disparado.....	42
Figura 20. Diseño de carga para taladros de producción	43
Figura 21. Diseño de carga para taladros de procedimiento (buffer).....	43
Figura 22. Diseño de amarre electrónico con cuidado de pared	44
Figura 23. Conformación de las fases de la emulsión W/O	49
Figura 24. Efecto del balance de oxígeno en el calor de explosión y el volumen de gases teórico	53
Figura 25. Efectos del pH y la temperatura en el proceso de gasificación.	56
Figura 26. Sistema de control para la inyección de nitrito de sodio.	57
Figura 27. Sistema vaciable de carguío de explosivos.....	58
Figura 28. Sistema bombeable de carguío de explosivos usado solo para taladros con agua.....	58
Figura 29. Cálculo de la presión en un punto dentro de la columna explosiva.....	59
Figura 30. Cálculo de la densidad promedio real de la columna explosiva luego del esponjamiento.	60
Figura 31. Densidad de taza y la densidad promedio dentro del taladro	61
Figura 32. Correlación entre densidad de taza y VOD para la emulsión gasificada. 63	
Figura 33. Tasa de excavación para el ANFO y la emulsión G a densidad 0.80.	66

Figura 34. Tasa de excavación para el HA37 y la emulsión G a densidad 1.00.	66
Figura 35. Tasa de excavación para el HA46 y la emulsión G a densidad 1.10.	67
Figura 36. Zonas y puntos monitoreados en el disparo en TO.	68
Figura 37. Análisis combinado en la zona disparada con HA 46	69
Figura 38. Fotos de los puntos 1 y 2 y muestra de camión cargado.....	69
Figura 39. Análisis combinado en la zona disparada con emulsión G a densidad 1.10	70
Figura 40. Fotos de los puntos 3 y 4 y muestra de camión cargado.....	70
Figura 41. Diseño de carga zonificado para la prueba de fragmentación.....	71
Figura 42. Costos por taladro entre el ANFO y la emulsión G ($D=0.8 \text{ g/cm}^3$).....	75
Figura 43. Costos por taladro entre el HA37 y la emulsión G ($D=1.0 \text{ g/cm}^3$).....	76
Figura 44. Costos por taladro entre el HA46 y la emulsión G ($D=1.10 \text{ g/cm}^3$).....	77
Figura 45. Costos por taladro entre el HA 64 y la emulsión G ($D=1.15 \text{ g/cm}^3$).....	78
Figura 46. Costos por taladro de emulsión G, ANFO pesado y ahorros calculados.	79
Figura 47. Tendencia lineal ($R>0.95$) del costo por taladro respecto a la densidad.	80
Figura 48. Altura de carga equivalente para el HA37 en taladros de 10 5/8''	81
Figura 49. Proyección de consumo con datos similares al presupuesto del 2015	84
Figura 50. Proyección de consumo realizando los cambios de ANFOs pesados a emulsión G.	85
Figura 51. Ahorro proyectado reemplazando los ANFOs pesados con emulsión G.	86
Figura 52.- Consumo semanal de nitrato de amonio.	87
Figura 53. Consumo semanal de emulsión.	87
Figura 54. Costo por tonelada volada versus el presupuesto BP2015.....	88
Figura 55. Ahorros anualizados en millones de dólares y tasa de descuento.	89

Figura 56.- Prueba de VOD realizada en el tajo Chaquicocha.	96
Figura 57.- Prueba de VOD realizada en el tajo Tapado Oeste.	96
Figura 58.- Prueba de VOD realizado en el tajo Cerro Negro.....	97
Figura 59.- Prueba de VOD realizada en el tajo Tapado Oeste.	97

RESUMEN

En el presupuesto del año 2015, la Gerencia General de la Empresa Minera Yanacocha SRL (MYSRL), luego de realizar un benchmarking con otras unidades operativas de la corporación Newmont, planteó al área de perforación y voladura la búsqueda de tecnologías que reduzcan el costo por tonelada primaria removida manteniendo o mejorando los resultados producidos por los disparos.

La emulsión gasificada se muestra como una alternativa de solución que puede reemplazar los explosivos convencionales usados en MYSRL, tales como en ANFO y el ANFO pesado, planteando un ahorro aproximado de \$ 40,000 mensuales, mejoras en la fragmentación de la roca y la eliminación de gases nitrosos productos de las voladuras; además de mejorar la resistencia del explosivo a terrenos con presencia de agua, los cuales se presentan durante todo el año en MYSRL.

ABSTRACT

In the Budget of 2015, general managers from Minera Yanacocha SRL (MYSRL), after to benchmark with other mining companies of Newmont Mining Corporation, ask to blasting team searching new technologies that reduce the cost for prime tonnage removed maintaining or improving the blasting results.

Gasified emulsion shows like a solution alternative which can replace the typical explosives, like ANFO and heavy ANFO, proposing to save money by \$ 40,000 per month, improving rock fragmentation and eliminating noxious gases; besides of improving the explosive's resistance to fields with water presence, which they are presented throughout the year in MYSRL.

INTRODUCCIÓN

Desde los años '60 los agentes de voladura no han cambiado significativamente; los agentes más comerciales, como el ANFO (Ammonium Nitrate Fuel Oil) y la emulsión han sido aplicados en muchas minas como explosivos únicos o como mezclas explosivas llamadas también ANFO pesados, su aplicación depende principalmente de la geomorfología de la roca y las condiciones del terreno (agua, presencia de azufre nativo, etc.). Los precios unitarios de estos agentes se manejan mundialmente mediante la ley de oferta y demanda del mercado global.

En Minera Yanacocha SRL se han utilizado generalmente los ANFOs pesados formulados a partir de la emulsión matriz (emulsión TC), la cual no reacciona químicamente con ningún compuesto. Estas mezclas explosivas poseen densidad no variable y no son muy resistentes al agua, generando presencia de gases nitrosos al momento de la voladura bajo estas condiciones.

La emulsión gasificada (emulsión G) es un agente de voladura que reacciona químicamente al nitrito de sodio generando burbujas de nitrógeno, por lo que la densidad de ésta puede variar con relación a la inyección de nitrito de sodio. Este

explosivo posee una resistencia mayor al agua (no genera gases nitrosos) y un tiempo de permanencia en los taladros de más de 3 días.

Hipótesis: La emulsión gasificada a diferentes densidades reemplazará técnica, ecológica y económicamente al ANFO y al ANFO pesado usados en todas las operaciones de voladura en Minera Yanacocha SRL.

Metodología de investigación: Se han realizado pruebas de velocidad de detonación (VOD) para encontrar las densidades equivalentes de la emulsión G con los ANFOs pesados usados en MYSRL. Además se han realizado mediciones de esponjamiento dentro de los taladros con la finalidad de calcular el factor de esponjamiento para cada densidad de la emulsión G. Finalmente se hicieron pruebas de disparos de producción con emulsión G y ANFO pesado con emulsión TC en zonas geológicamente similares con el propósito de calcular y comparar la tasa de excavación (dig rate) de los equipos de carguío y la granulometría producto de la voladura.

Los objetivos generales de este proyecto de tesis son:

- Reducir el costo unitario de voladura (\$/TM) mediante el reemplazo del ANFO y ANFO pesado por la emulsión gasificada a diferentes densidades.
- Evaluar económicamente el reemplazo propuesto para el periodo 2015-2019.

Los objetivos específicos de este proyecto de tesis son:

- Reemplazar el ANFO y el ANFO pesado usados en Minera Yanacocha SRL con la emulsión gasificada sin afectar los resultados de la voladura ni de los procesos ligados a ésta.
- Eliminar la presencia de gases nitrosos producto de la voladura.
- Utilizar un explosivo que posea excelente resistencia al agua y que pueda ser usado en Minera Yanacocha SRL bajo condiciones de taladros inundados.

Los resultados demostraron que si es técnica y ecológicamente factible reemplazar los ANFOs pesados con la emulsión G a diferentes densidades. Además se encontraron densidades equivalentes de la emulsión G para los diferentes ANFO pesados. Esto ayudó a poder comparar económicamente los taladros cargados con emulsión G contra los mismos cargados con el ANFO pesado equivalente. Se demostró que la emulsión G puede reemplazar a todos los ANFOs pesados con porcentaje de ANFO mayor o igual a 30%.

Finalmente se calculó el probable ahorro, realizando el reemplazo de los ANFOs pesados con emulsión G, para el periodo 2015 – 2019 obteniendo un valor presente neto de \$ 2.95 millones a una tasa de descuento del 12%; con lo que haría completamente factible el reemplazo propuesto.

CAPITULO I. DESCRIPCIÓN DE MINERA YANACOCCHA

1.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD

Minera Yanacocha S.R.L (Minera Yanacocha) está localizado en el norte de los Andes de Perú, dentro del distrito de la Encañada en la provincia y departamento de Cajamarca a 32 km al NE de la ciudad de Cajamarca y a 800 km al NE de la ciudad de Lima. Las instalaciones de Minera Yanacocha abarcan un área de 125 km² en un área con elevaciones que van desde los 3,750 hasta los 4,200 msnm (Ver figura 1).

1.2. CLIMA

El clima es típico de zonas de sierra, relativamente frío y ventoso con temporadas secas y lluviosas. La temporada de lluvia empieza en el mes de Octubre y termina en el mes de Abril, siendo Julio el mes más seco y Marzo el más húmedo. La lluvia anual es alrededor de 780 mm (L/m²). El promedio anual de temperatura máxima es de 21 °C y el promedio mínimo es de 4.6 °C.

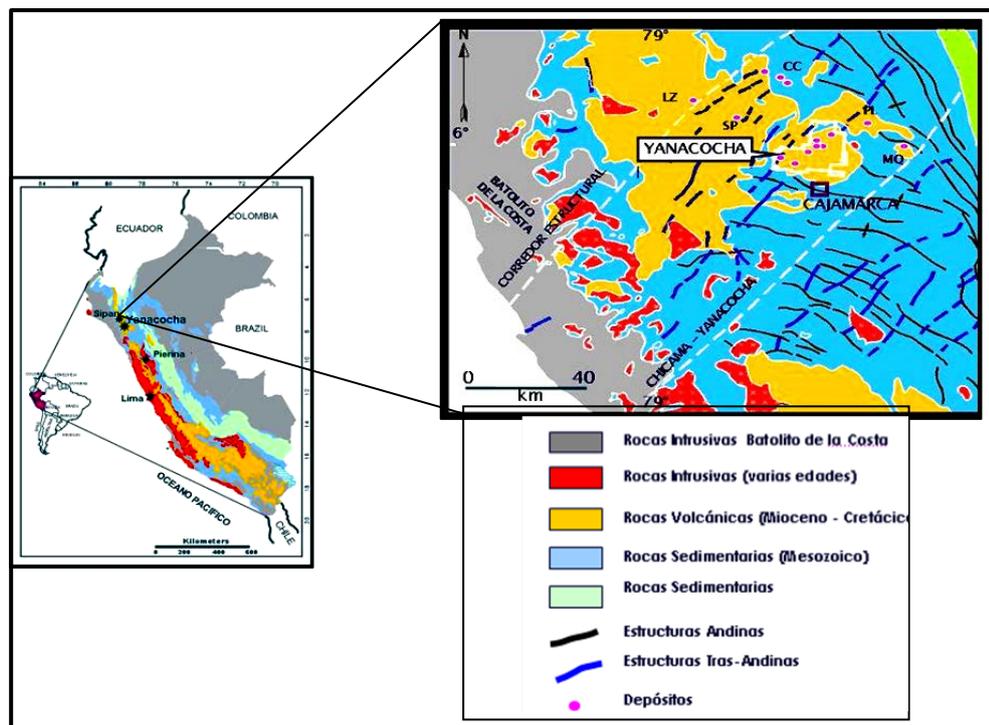


Figura 1. Ubicación Geográfica del Distrito Minero de Yanacocha y su relación con las unidades geológicas y sistemas estructurales

1.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El área donde se ubica la propiedad de Minera Yanacocha ha sido explorada desde inicios de 1960. En 1981, se descubrieron depósitos aprovechables, por lo cual la Compañía de Minas Buenaventura (empresa privada peruana), Newmont Mining Corporation (Newmont, una de las empresas mineras de oro más grandes del mundo) y la Corporación Financiera Internacional (IFC, por sus siglas en inglés) se asociaron y formaron la empresa Minera Yanacocha S.R.L. para iniciar la explotación de este yacimiento. Minera Yanacocha inició sus operaciones en agosto de 1993 con la ejecución del Proyecto Carachugo; posteriormente entraron en operación los Proyectos Maqui Maqui (1994), Cerro Yanacocha (1997) y la Quinua (2001) y Cerro Negro (2003).

Restos arqueológicos indican que las culturas Incas, Pre-Incas y probablemente Pre-Cajamarca han minado activamente el área de Yanacocha desde los años 100 d.C. hasta 700 d.C. seguida por la actividad minera desarrollada por los españoles en la época de la conquista y del virreinato.

La exploración en el Distrito Minero de Yanacocha empezó con fuerza en 1968 por parte de la compañía Japonesa Nippon Mining en busca de pórfidos de cobre, luego fue explorado por la British Geological Survey (B.R.G.M. siglas en francés), y CEDIMIN un organismo estatal francés; posteriormente CEDIMIN se asoció a las empresas Newmont Mining Corporation y Compañía de Minas Buenaventura, retirándose en 1994. Actualmente, la mina es explotada por un consorcio integrado por la empresa norteamericana Newmont Mining Corporation (tiene el 51,35 % de la mina), la empresa peruana Compañía de Minas Buenaventura (posee un 43,65 %) y la IFC, organismo dependiente del Banco Mundial (posee el restante 5%).

Los estudios metalúrgicos preliminares comenzaron en Carachugo en 1989 y una planta piloto de lixiviación fue construida. El estudio de factibilidad fue completado y aprobado por el IFC durante 1991. La primera onza de oro fue producida el 07 de agosto de 1993 y a partir de 1996, Yanacocha se convirtió en la operación de lixiviación de oro más grande del mundo.

La operación minera en los depósitos de San José y Carachugo han sido concluidos y actualmente se encuentran en plan de cierre de mina; sin embargo, onzas de oro se siguen recuperando del pad de lixiviación de Maqui Maqui. Los complejos mineralógicos Cerro Yanacocha, La Quinoa y Chaquicocha están siendo minados actualmente y el material rico en oro está siendo depositado, dependiendo de la ley y

el revenue, en los pad de lixiviación de Carachugo, Yanacocha, La Quinua o en los stocks para la planta de Gold Mill.

1.4. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Los basamentos litológicos en la región de Yanacocha están caracterizados por una secuencia deformada de sedimentos cretácicos, los cuales fueron erosionados generando una superficie de bajo relieve antes de la deposición del complejo volcánico Yanacocha en el Mioceno medio.

El complejo volcánico Yanacocha (CVY, 11 - 12.5 Ma) ha sido subdividido dentro de series de cinco ciclos magmáticos eruptivos-intrusivos. El CVY está confinado dentro de un largo de 24Km con tendencia noreste y depresión vulcano tectónica (ver figura 2)

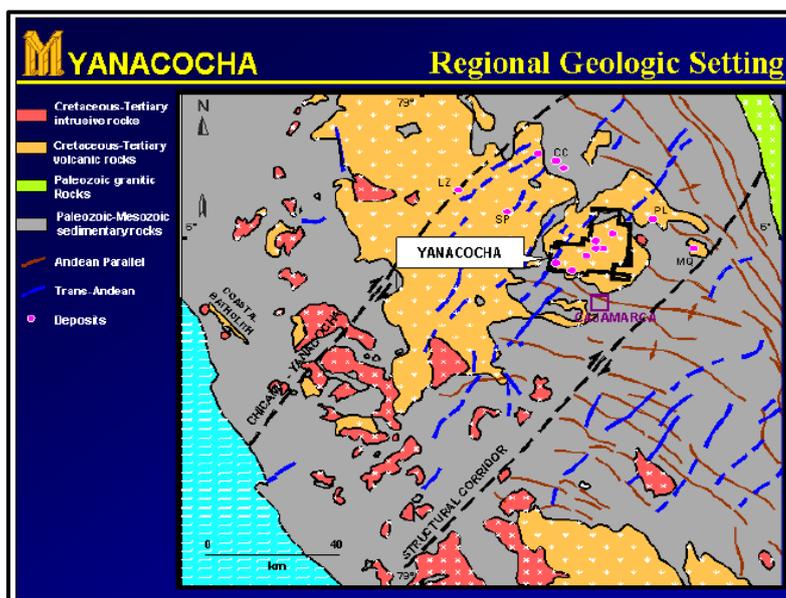


Figura 2. Plano geológico del Distrito Minero de Yanacocha (C. Loayza et al. 2002).

La unidad “Lower Andesitic Sequence (LAS)” del CVY comprende series de lavas andesíticas y domos de flujos andesíticos complejos con menor cantidad de flujos piroclásticos intercalados. El estado inicial de la actividad volcánica fue seguido por un periodo de tranquilidad eruptiva, cuando una actividad hidrotérmica penetrante alteró el LAS. La sedimentación durante este periodo estuvo caracterizada por ocurrencias locales de sílice coloidal, los cuales fueron depositados en lagos ácidos que se desarrollaron dentro de cráteres o depresiones topográficas, asociadas con vetas y actividad hidrotermal.

El periodo de tranquilidad fue seguido por una intensa actividad volcánica, resultando en una amplia y pobre cristalización de cuarzo. Estos fragmentos litológicos contienen clastos de alteración volcánica previa, sugiriendo que en la fase inicial del pervasivo, la alteración sulfúrica y silicificación ocurrieron antes de la erupción.

El final del ciclo magmático del CVY fue violento con múltiples erupciones freáticas, los cuales produjeron brechas heterolíticas que cortan todos los estratos litológicos y ensambles de alteraciones. Después de múltiples estados, diques altos y bajos las brechas freáticas primarias. En el último estado, las fases resurgentes concluyen con el emplazamiento de andesitas y latitas así como con domos complejos de feldespatos porfiríticos.

Flujos túficos de cenizas post-mineralización de la formación Huambos (8.4 – 9.9 Ma) están expuestos alrededor del perímetro del CVY y están representadas por cuerpos intrusivos riódacíticos en el área del lago Yanacocha. La posterior glaciación de la región erosionó preferentemente los ensambles de alteraciones menos resistentes

de argílico y sílice granular, mientras que las litologías de sílice masiva y vuggy fueron preservadas en las partes altas.

1.5. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL, LITOLOGÍA Y ALTERACIONES

1.5.1. Geología estructural.

Existen tres tendencias estructurales principales que controlan la mineralización: N35-50W, N40-60E y EW (Edwards, 2000; Longo, 2000; Harvey et al., 1999; Myers, 1997). Estas estructuras están relacionadas al cinturón Mesozoico en el área de Yanacocha. También existen otras estructuras de importancia que están interpretadas como fallas al oeste del distrito y que controla la mineralización de Cerro Negro y Cerro Quilish (reconocidas por Myers 1997, Klein et al. 1999). La presencia de alunita en estas fallas permite asociar estas estructuras con las principales fase de mineralización.

El complejo Yanacocha es localizado dentro de una estructura NW de un paleo graben sobre la secuencia de LA (“Lower Andesite”), limitado hacia el noreste por la falla Yanacocha-Carachugo y hacia el suroeste por la falla Diablo Pacifico. El graben está relleno por la secuencia de tufos Tft (unidad transicional de tufo fino), TEUT (unidad transicional eutaxítico) y USJ (unidad San José) que albergan la mineralización (Ver figura 3).

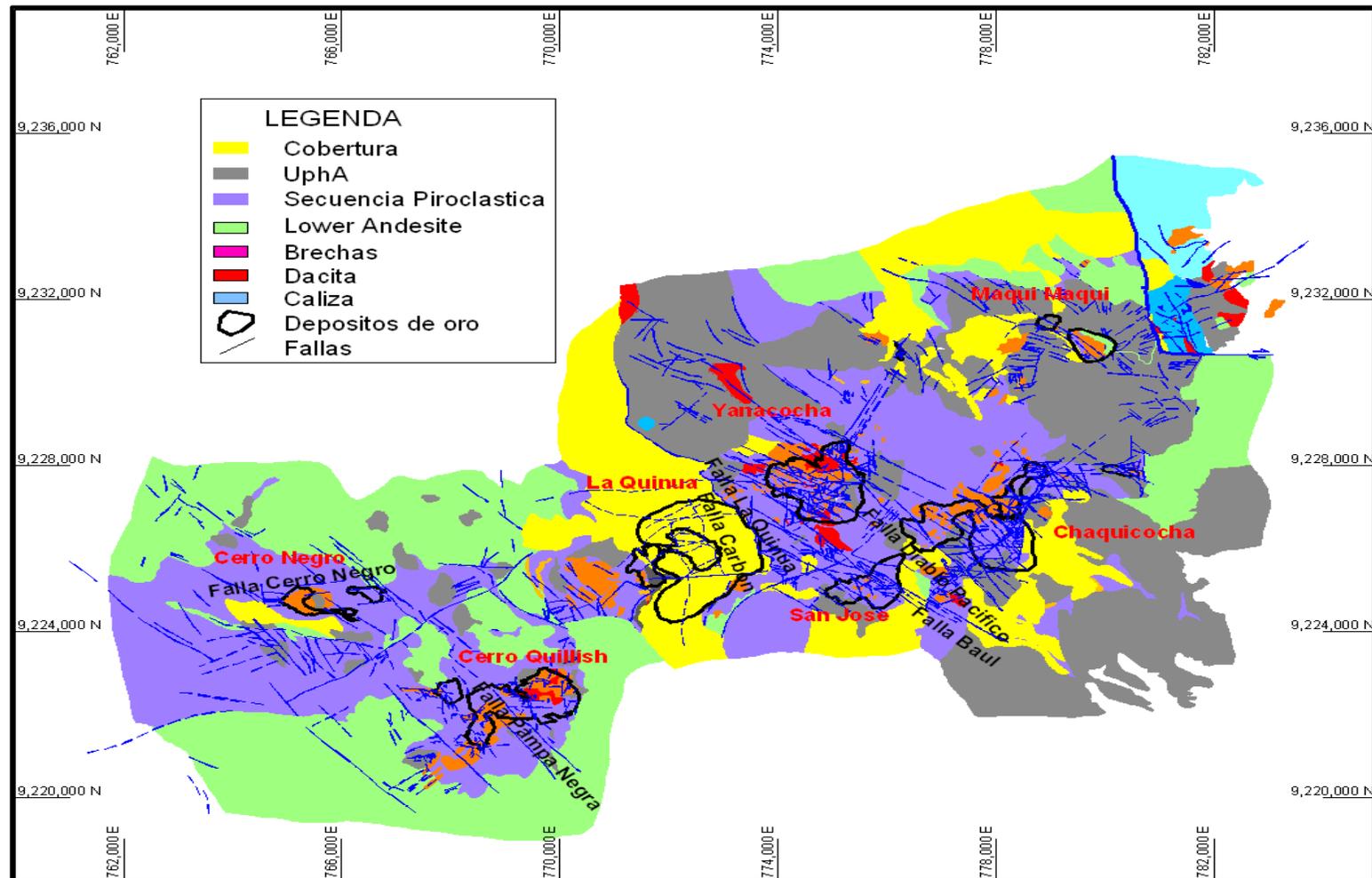


Figura 3. Plano con las estructuras principales del Distrito Minero de Yanacocha (J. Gomez, S. Moore, L. Teal, (2003)).

En el distrito existen calderas que forman un alineamiento SW-NE que es coincidente con la dirección estructural regional conocida como Corredor Estructural Chicama Yanacocha (A. Quiroz, 1997). También existe un segundo corredor estructural notado por la existencia de un conjunto de fallas de rumbo NNW-SSE que se alinean desde la Quebrada Azufre hasta Hualgayoc, este corredor estructural es denominado Yanacocha-Hualgayoc (sistema Diablo Pacifico, ver figura 4). La mineralización en la intersección de estos dos grandes corredores estructurales presenta numerosas estructuras mineralizadas relacionadas a fracturas y fallas tensionales relacionadas al sistema NNW-SSE (A. Quiroz, 2002).

1.5.2. Litología

Las rocas del Basamento de Yanacocha consiste de unidades del Cretáceo inferior, medio y superior del Grupo Gollarisquizga, que consiste principalmente de areniscas de grano grueso intercaladas con limolitas, calizas y calizas limosas, con capas de carbón en la base y hacia el tope la presencia de conglomerados y areniscas de color rojo (Reyes, 1980; Megard, 1987; INGEMMET, 1995). Sobre esta secuencia calcárea se encuentra las rocas volcánicas del Terciario conocidas regionalmente como Grupo Calipuy, que consiste aproximadamente de 2000 m de flujos de lavas y flujos de piroclastos. Regionalmente el Grupo Calipuy ha sido subdividido en tres unidades, de la base hacia el tope: Volcánicos Llama, Volcánicos Porculla y la Formación Huambos (Wilson, 1984). En el distrito de Yanacocha, Turner (1997) renombra a los Volcánicos Porculla como Complejos Volcánicos Yanacocha (CVY) y lo describe como un centro volcánico que

alberga la mineralización del distrito. En la Figura 5, se observa la columna estratigráfica del Complejo Volcánico de Yanacocha (CVY) desde la base hacia el tope.

1.5.3. Alteraciones

En el Distrito Minero de Yanacocha existe yacimientos de tipo epitermal de alta sulfuración como: Yanacocha, Chaquicocha, El Tapado, Maqui Maqui, Carachugo, Cerro Negro, Corimayo, Cerro Quilish, San José y también existe yacimientos fluvio glaciares siendo el más conocido La Quinua (ver figura 4)

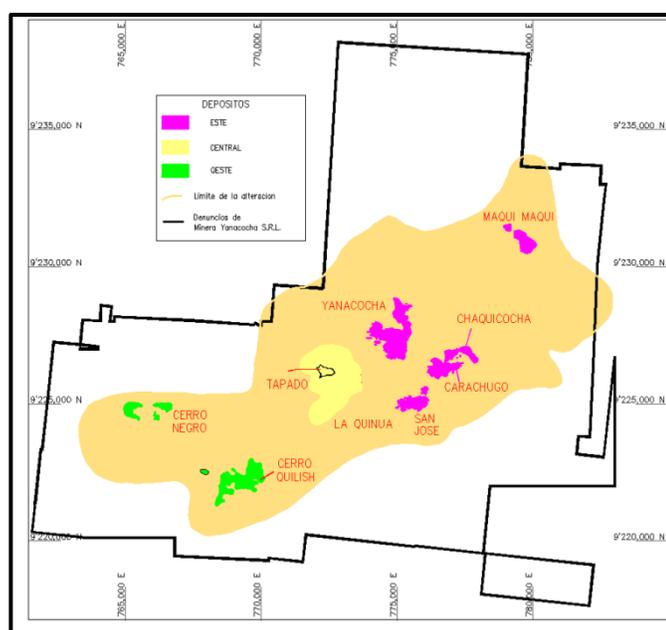


Figura 4. Depósitos de mineralización

Newmont Mining Corporation (2009). *Mineral resource and ore reserve report.*

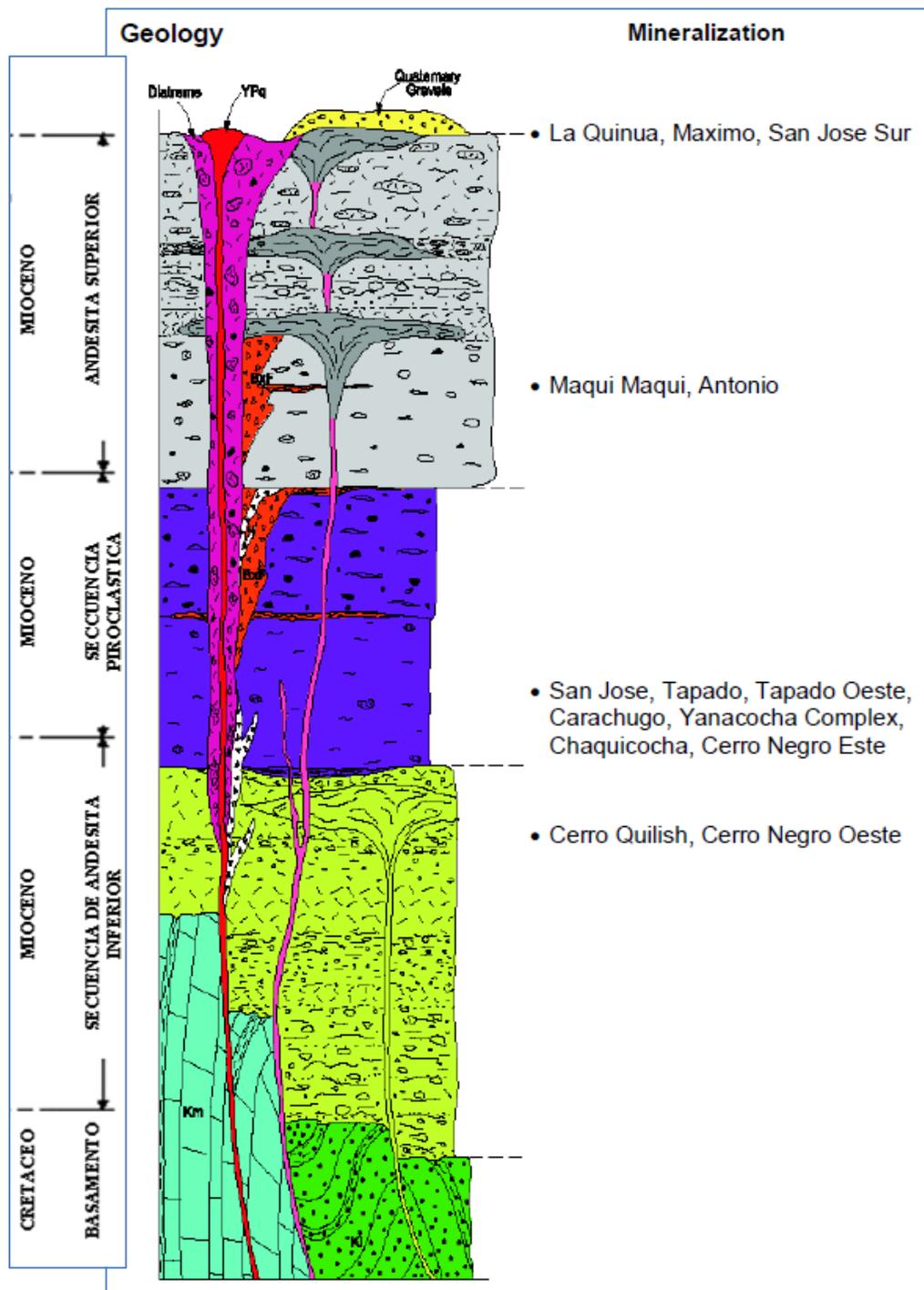


Figura 5. Columna estratigráfica del complejo volcánico de Yanacocha. Newmont Mining Corporation (2009). *Mineral resource and ore reserve report.*

La alteración en el distrito es típica de un sistema de alta sulfuración (Ver figura 6) con un zoneamiento que gradúa del centro hacia fuera de sílice masiva a sílice alunita - pirofilita (alteración argílica avanzada) seguido por la presencia de arcillas-caolinita gradando a montmorillonita (alteración argílica), terminando en alteración propilítica cubierto por rocas frescas. Volumétricamente las arcillas son las más abundantes pero la alteración silíceo es la más importante para la mineralización de oro. Las dataciones de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ indican una edad de 10,9 a 11,46 Ma. Las características geomecánicas de las alteraciones litológicas presentadas en MYSRL se detallan en la tabla 1.

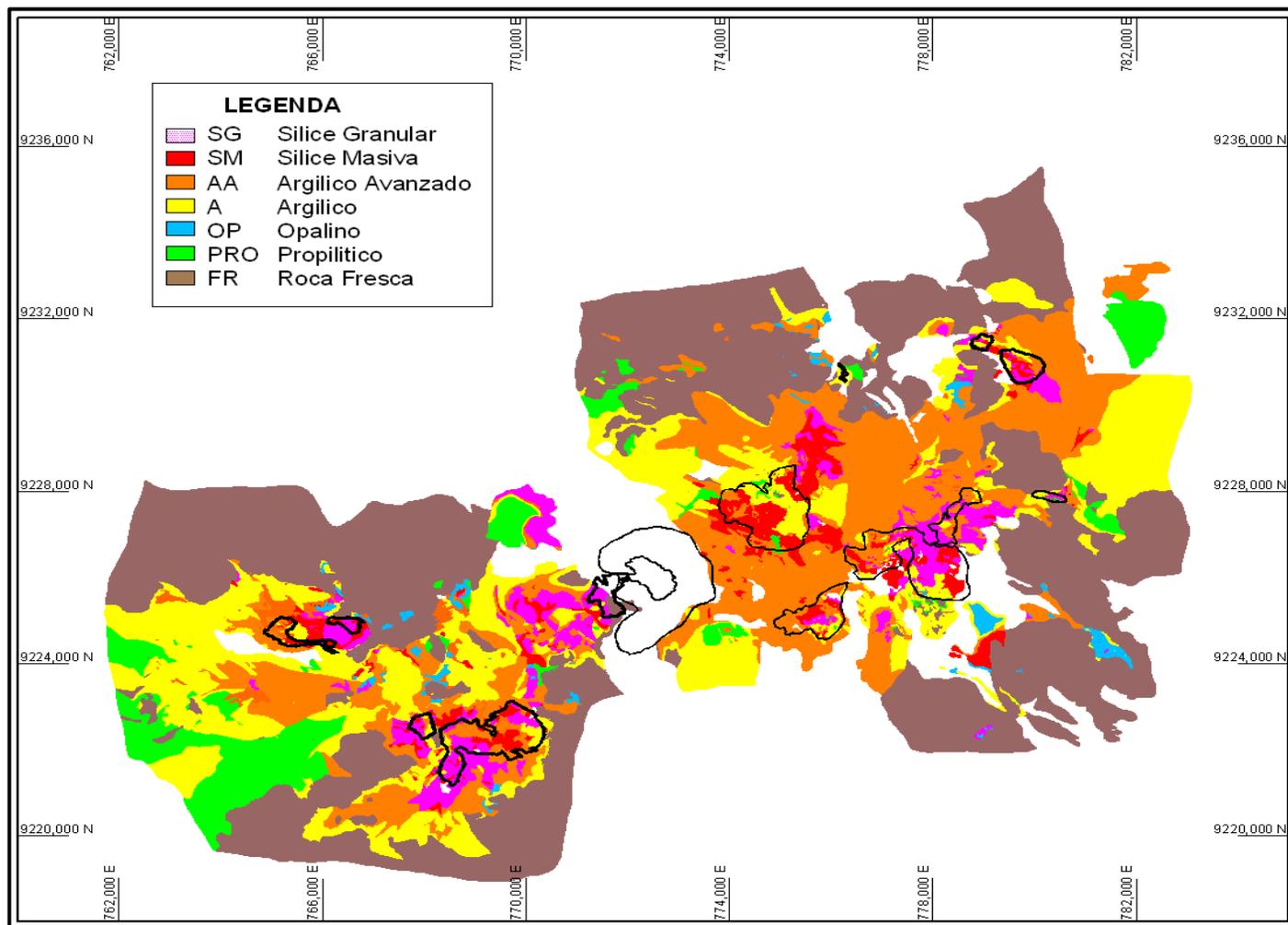


Figura 6. Plano de Alteraciones Hidrotermales en el Distrito de Yanacocha (J. Gomez, S. Moore, L. Teal, 2003).

Tabla 1. Alteraciones litológicas en MYSRL

ALTERACION	DUREZA (ISRM)	CARACTERISTICA
Sílice Masiva	5	Mineralización predominante. Es una masa densa de sílice microcristalina.
Sílice Vuggy	4	Formada por la condensación de vapores magmáticos. Conformada por cuarzos finos.
Sílice Granular	3	Textura arenosa a granular, cubre las alteraciones Vuggy y Masiva.
Argílico Avanzado	3	Presenta ensambles Sílice/alunita/pirofilita. Mineralización media.
Argílico	2	Presenta ensamble caolinita/illita/pirofilita y pirita. La matriz esta alterada por arcillas.
Propilítico	4	Gradación de la alteración argílica. Ensamble Clorita/Illita – Calcita – Pirita.
Good/bad Blend - ROM	-	Tipos de suelo.

1.6. OPERACIÓN EN LA MINA

El proceso de producción en MYSRL consiste en la extracción de suelos, óxidos y ciertos sulfuros secundarios y primarios de mineral vía movimiento de tierras a tajo abierto para su posterior descarga en pads de lixiviación, stocks para la planta de Gold Mill y depósitos de material sin contenido de oro. Tanto en los pads de lixiviación como en la planta de Gold Mill, el mineral es procesado para luego ser enviado a la fundición y producir barras de Doré (Oro y plata) para su posterior comercialización. La granulometría requerida para cada punto de descarga es solicitada al área de perforación y voladura.

Los KPIs más importantes de las sub-áreas de operaciones mina se detallan a continuación:

- **Perforación**

- TDC (Total Drilling Cost)
- Velocidad de penetración
- Velocidad de perforación
- Calidad de profundidad
- Calidad de posicionamiento

- **Voladura**

- Factor de carga
- Esponjamiento
- Dilución
- Fragmentación

- **Carguío**

- Dig Rate
- Productividad efectiva
- Productividad
- Queue y Hang (Fleet Match)
- Payload

- **Acarreo**

- Velocidad cargado y velocidad vacío
- TKPH (Tonelada por kilómetro-hora)
- EFH (Equivalent Flat Hauling)

CAPITULO II. PERFORACIÓN Y VOLADURA

2.1. EQUIPOS DE PERFORACIÓN PRESUPUESTADOS

Los equipos presupuestados en MYSRL están alineados con el plan de minado y los diferentes tajos a minar. La figura 7 muestra el tonelaje y los equipos de perforación alineados a ello y la tabla 2 una breve descripción técnica de cada tipo de perforadora.

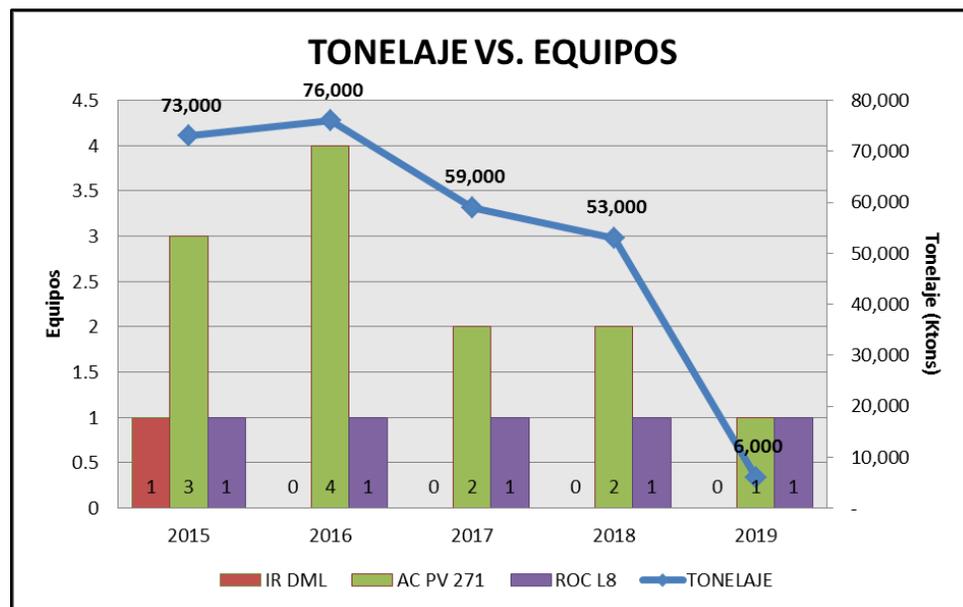


Figura 7. Equipos de perforación presupuestados.

Tabla 2. Especificación técnica de las perforadoras en MYSRL.

AC PV 271	
Estas perforadoras son usadas para la perforación de producción de los tajos con alturas de banco mayores a 10.0 m	
Método de Perforación	Perforación Rotativa y DTH –Multi Pass
Diámetros usados en MYSRL (in.)	7 7/8'', 9 7/8'', 10 5/8''
Pull Down (N)	311 375
Peso sobre la broca (N)	333 617
Profundidad máxima	32.0 m (Con dos barras)
Velocidad de traslado	0.6 m/s
Peso Estimado	84 Ton.
IR DML	
Estas perforadoras son usadas para la perforación de producción de los tajos con alturas de banco menores a 10.0 m y/o para perforar zonas estrechas e inestables.	
Método de Perforación	Perforación Rotativa y DTH –Multi Pass
Diámetros usados en MYSRL (in.)	7 7/8'', 9 7/8''
Pull Down (N)	266 893
Peso sobre la broca (N)	266 893
Profundidad máxima	13.0 m (Con dos barras)
Velocidad de traslado	0.7 m/s
Peso Estimado	40 Ton.

ROC L8

Es usada exclusivamente para los precortes inclinados y verticales, así como para voladura de bolonería y proyectos especiales.

Método de Perforación	DTH
Diámetros usados en MYSRL (in.)	5 1/4'', 6 1/8''
Presión de compresor (KPa)	2 500
Capacidad de compresor (m ³ /hr)	1 457
Profundidad máxima	54.0 m (Barra de 6.0 m de longitud)
Perforación inclinada	Máx. 30°
Peso Estimado	2.1 Ton.

2.2. DISEÑO DE MALLAS DE PERFORACIÓN

Para el diseño de mallas de perforación se sigue la lógica que se muestra en la figura 8. Todas las mallas de perforación que se diseñan en MYSRL se hacen en base a las alteraciones litológicas (otorgadas por geología), a la clasificación ISRM (otorgadas por geotecnia) y al posible material resultante previo al muestreo de blastholes (modelo geológico de bloques). Esto nos ayuda a determinar el tipo de roca, la geología estructural y el posible destino según la ley de Au, Ag, Cu, etc.

Actualmente en MYSRL se tiene 4 tipos de mallas definidas y se diferencian según su distancia y alineamiento de la pared final de diseño del tajo; estas mallas son:

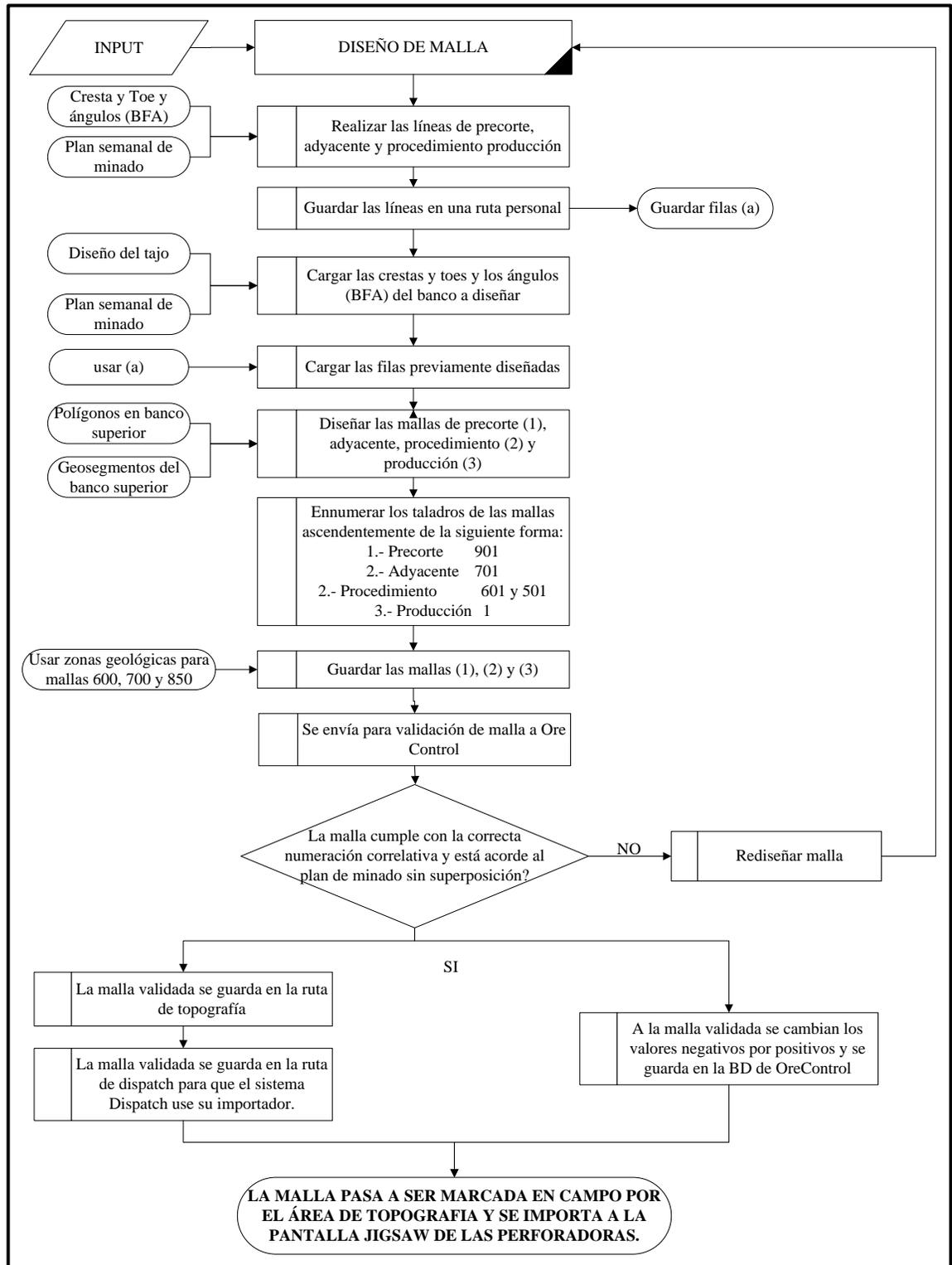


Figura 8. Diagrama de flujo para el diseño de mallas de perforación. Minera Yanacocha SRL (2014). *Procedimiento para diseño de mallas de perforación.*

- **Precorte:** Es un malla de perforación de una sola línea que se diseña de forma paralela al límite de diseño del tajo. Esta malla solo sirve para generar una plano vacío de corte que reduzca las vibraciones dentro del talud final del tajo. Estas mallas se guardan con numeración ascendente desde 901 y los taladros se enumeran desde el 901 hacia adelante. (Espaciamiento = 2,0m)
- **Adyacente:** Es la segunda fila de taladros paralelo al precorte y que sirve como malla de amortiguamiento (buffer). El factor de carga (F.C.) para los taladros de esta malla debe de ser similar al F.C. de los taladros de producción pero con burden (B) y espaciamiento (E) menor a éstos; de tal manera de garantizar la menor carga explosiva por taladro. Estas mallas se guardan con numeración ascendente desde 101 y los taladros se enumeran desde el 701 hacia adelante. (BxE = [3,3 – 3,5]m x [4,8 – 5,0]m)
- **Procedimiento:** Consiste de 02 filas buffer adicionales paralelas al adyacente en donde, al igual que en ésta, el F.C. debe mantenerse igual que los taladros de producción con un burden y espaciamiento mayor que la malla adyacente pero menor que la malla de producción. Estas mallas se guardan con la misma numeración que las mallas de adyacente y los taladros de una fila se enumeran desde el 501 hacia adelante, mientras que los taladros de la otra fila se enumeran desde el 601 hacia adelante. (BxE = [4,5 – 5,2]m x [6,0-6,5]m)
- **Producción:** Este tipo de mallas se diseñan a continuación de las mallas de procedimiento y son las que generan la mayor producción de material

fragmentado producido por la voladura. Estas mallas se guardan con numeración ascendente desde 101 y los taladros se enumeran desde el 001 hacia adelante. Los parámetros de burden y espaciamiento de estas mallas se diseñan de acuerdo al “Cookbook 2015” mostrado en la tabla 8 (Sección 2.5)

Tomando como referencia las posibles leyes y contenido metálico (Au, Ag, Cu, etc.) es que el área de geología define zonas, en las cuales la malla de perforación a diseñar debe ser numerada de manera especial (Malla 600, Malla 700 y Malla 850) para garantizar un correcto análisis químico del detritus de perforación.

- **Malla con numeración 600:** Malla designada para zonas de mineral con baja y/o mediana ley y destino a los pads de lixiviación.
- **Malla con numeración 700:** Malla designada para zonas de mineral con presencia de plata (Ag) y destino el pad de lixiviación.
- **Malla con numeración 850:** Malla designada para zonas de mineral con alta ley y destino a la planta de Gold Mill.

Finalmente, y luego de ser validada la malla por el área de Ore Control, ésta es guardada en la base de datos del sistema de despacho para ser transferida a las perforadoras con sistema alta precisión y seguir con el siguiente paso de la secuencia operativa.

2.3. EXPLOSIVOS DISPONIBLES Y SU APLICACIÓN

2.3.1. Explosivos primarios.

Los explosivos primarios, también llamados iniciadores, se descomponen mediante una detonación si son iniciados con un pequeño estímulo externo. Este estímulo puede ser prácticamente de cualquier tipo: llama, fricción, impacto, choque, corriente o descarga eléctrica, radiación, etc.

Su sensibilidad es muy elevada, sobre todo cuando son puros, y suele depender en gran medida de su estructura cristalina y su granulometría. La sensibilidad puede reducirse por flegmatización (adición de aceites u otros líquidos que reducen la sensibilidad. En este caso es muy corrientemente con agua).

Los explosivos primarios que se usan en Yanacocha se detallan a continuación:

2.3.1.1. *Detonadores electrónicos.*

Los detonadores electrónicos representan el 90% de todos los taladros disparados en MYSRL, esto debido a su gran precisión, seguridad y adaptabilidad; además de traducirse en el uso de mallas de perforación más grandes con resultados mejores o similares en granulometría. En la tabla 3 se detalla las características de los detonadores electrónicos Davey Tronic.

Tabla 3. Ficha técnica de detonadores electrónicos

CARACTERISTICA	RANGO DE VALORES
Rango de temperatura	-20 °C a 45 °C
Impermeabilidad	1 300 MPa / 7 días
Resistencia a descargas electrostáticas	30 KV / 3500pF
Retardos	Desde 0 hasta 14 000 ms
Precisión	± 0.02%
Resistencia a radiofrecuencias	Cumple EN 13 763 – 27 (*)
Potencia	Detonador # 8
Carga Base	800 gr PETN

(*)Norma: UNE-CEN/TS 13 763-27 (2004) *Parte 27: Definiciones, métodos y requisitos de los sistemas de iniciación electrónicos*. Explosivos para uso civil. Detonadores y relés

2.3.1.2. *Detonadores no eléctricos (Nonel)*

Solo el 10% del material fragmentado en MYSRL se realiza con detonadores no eléctricos y ello debido a que solo se usan estos detonadores cuando no estemos cerca a límites finales de talud y/o zonas en donde se deban controlar las vibraciones. Sin embargo, por medida de seguridad y estándar de Newmont, cada taladro con un detonador electrónico deberá ir respaldado con un de Nonel a forma de “Back Up”.

2.3.2. Explosivos Secundarios.

Los explosivos secundarios o rompedores (Alto velocidad de detonación) son cargas explosivas de alta potencia y gran seguridad por presentar baja sensibilidad a los golpes o roces; éstos solo se pueden detonar mediante un explosivo primario o detonador # 8.

En MYSRL el 100% de explosivos secundarios (también llamada cebo) que se usa es el Booster de marca ENAEX de 1 lb (0,4536 Kg) de peso.

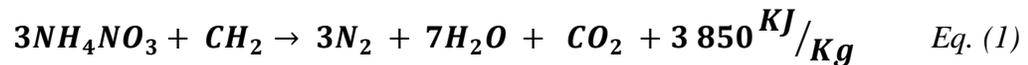
2.3.3. Agentes de voladura.

Son explosivos muy seguros por ser insensibles a los golpes, roces, calor, campo electrostático y al fulminante # 8. Para ser detonados se requiere de un explosivo secundario (cebo o “booster”)

2.3.3.1. ANFO (*Amonium Nitrate Fuel Oil*).

El nitrato de amonio en forma de prills (nombre que se le da a las partículas esféricas y porosas) es mezclado con petróleo (o cualquier hidrocarburo líquido) para producir una mezcla explosiva comercial llamada ANFO. En MYSRL el ANFO es producido mediante los camiones fábricas y depositado dentro de los taladros. La principal ventaja de preparar la mezcla dentro de la malla de voladura, es que no requiere procedimientos de transporte del diesel y del nitrato de amonio; debido a que éstos, de forma separada, no son clasificados como explosivos. Solo cuando estos ingredientes se encuentran mezclados es que la composición llega a ser considerado una mezcla explosiva.

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



Produciendo 3 850 KJ / Kg (920 Kcal/ Kg), que puede ser inferior en los productos comerciales según el contenido en materias inertes, y un volumen de gases de 970 l. La mezcla estequiométrica corresponde a un 95,3% de NA y un 5,7% de combustible líquido, que equivalen a 3,7 l de éste último por cada 50 Kg de NA.

La influencia que tiene el porcentaje de combustible sobre la energía desprendida y velocidad de detonación (VOD) para taladros de 270 mm (10 5/8'') se detalla en la figura 9.

Al ser el NA un material higroscópico, el agua es el principal enemigo del ANFO, pues absorbe una gran cantidad de calor para su vaporización y reduce considerablemente la potencia del explosivo. En taladros de 76mm (3'') de diámetro, una humedad superior al 10% produce la insensibilización del agente explosivo. En la figura 10 se observa el comportamiento de la velocidad de detonación (VOD) del ANFO respecto al porcentaje de agua para taladros de 3''.

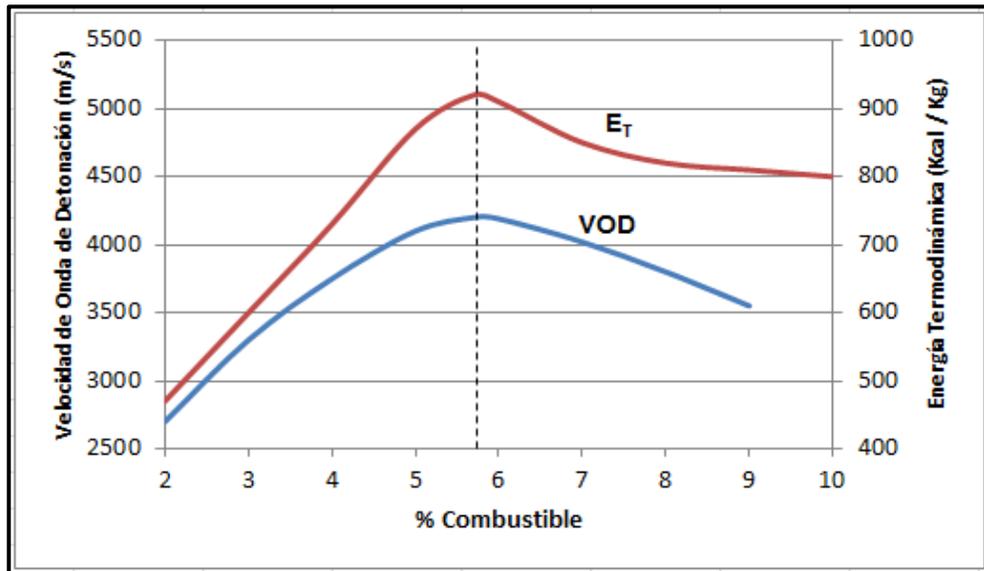


Figura 9. Influencia del porcentaje de combustible en el ANFO ENAEX (2010). *Manual de tronadura de ENAEX.*

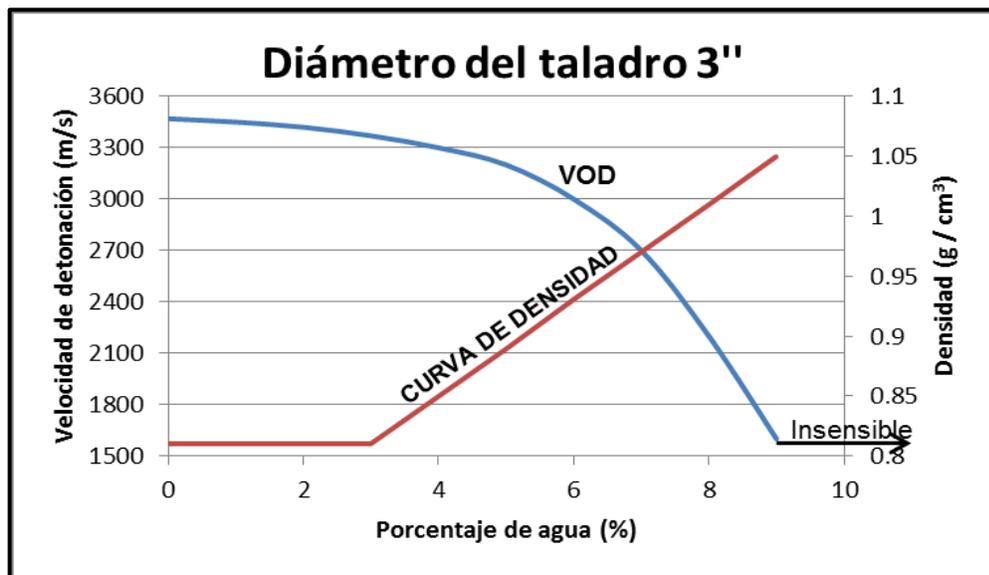


Figura 10.- Efecto del agua en taladros cargados con ANFO. ENAEX (2010). *Manual de tronadura de ENAEX.*

2.3.3.2. Emulsión.

La emulsión es una mezcla compuesta básicamente por una solución oxidante de Nitrato de Amonio y agua (solución dispersa), por un combustible insoluble en agua (solución continua), un agente emulsificante y por elementos sensibilizadores y potenciadores. La emulsión está basada en una dispersión de agua y aceite, el cual es formado por una solución acuosa saturada de nitrato de amonio en una fase de aceite mineral o combustible (Ver figura 11)

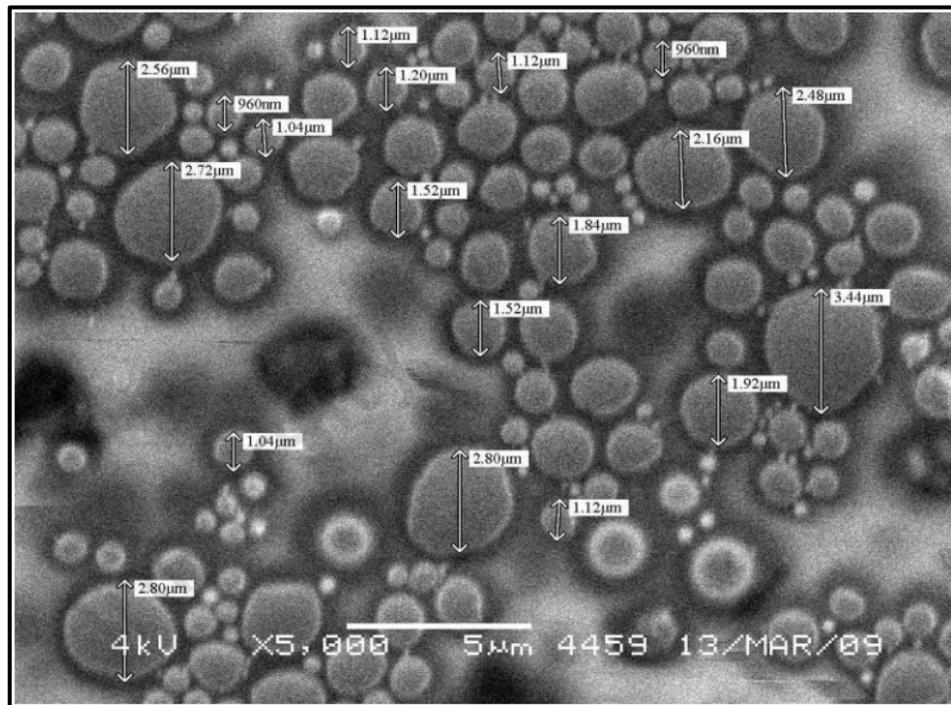


Figura 11.- Vista microscópica de la emulsión
 Pumeza M. (2010). *Kinetics reactions of Ammonium Nitrate – Sodium Nitrite reaction and Ammonium Nitrate Emulsion Explosive*

Las propiedades físicas de las emulsiones explosivas pueden cambiar de acuerdo a su aplicación; estas emulsiones son formuladas con rangos de viscosidad razonablemente bajos para que sean fácilmente bombeadas; sin embargo, pueden ser espesadas si es requerido para su encartuchamiento.

La temperatura del explosivo, también afecta la viscosidad que normalmente es controlada por la naturaleza de la fase oleosa (aceite, cera y emulsificante); así, un aceite de baja viscosidad producirá emulsiones bombeables mientras que aceites pesados producirán emulsiones encartuchables. La emulsión puede ser preparada en una fábrica y transportada para su carguío o preparada en campo mediante camiones mezcladores para ser bombeado a la malla perforada.

La sensibilidad de la emulsión a la detonación y su densidad, pueden sufrir variación añadiendo o creando espacios vacíos en la mezcla, bien por adición de micro-esferas huecas de vidrio o mediante un proceso de gasificación química que genera burbujas de gas nitrógeno.

El proveedor de emulsión para MYSRL es la empresa EXSA que fabrica y provee dos tipos de emulsiones, las cuales se fabrican en la planta de Chiclayo.

2.3.3.2.1. Emulsión TC

Emulsión oxidante a granel elaborada para el carguío mecanizado mediante bombeo principalmente en trabajos de minería de tajo abierto para taladros de gran diámetro. Esta emulsión fue desarrollada para ser empleada también en taladros calientes porque

minimiza la generación de humos naranjas cuando estos son producto de una mala reacción entre el explosivo y el medio que lo contiene.

Esta emulsión por sí sola no es sensible al booster y debe emplearse siempre junto al ANFO para formar mezclas explosivas (ANFO pesado) en la proporción que se requiera. En MYSRL se tienen instrumentos para medir la temperatura dentro de los taladros (pistolas térmicas); el procedimiento indica lo siguiente:

Taladros entre 30°C y 50°C solo se cargan el mismo día del disparo programado y se prima con cordón detonante de 10P. Taladros mayores a 50°C no se cargan.

Todos los taladros con presencia de agua dinámica y/o estática siempre deben llevar ANFO pesado con un porcentaje mayor o igual al 60% de la emulsión y deben ser cargados de manera bombeable desde el fondo del taladro para desplazar el agua. Las características técnicas de la emulsión TC (Slurrex TC) se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Ficha técnica de la emulsión TC (a granel)

Especificaciones Técnicas	Unidades	Slurrex TC
Densidad	g/cm ³	1.32 ± 3%
Velocidad de Detonación	m/s	Diferente por tipo de mezcla y diámetro de carga
RBS (Potencia relativa al volumen)	%	120
Resistencia al agua	Hora	72

2.3.3.2.2. *Emulsión Gasificada*

Emulsión a granel especialmente diseñada para la reducción de gases nitrosos y para ser usada en taladros con presencia de agua. Puede variar la densidad final dentro del taladro por medio de la formación de gases producto de reacciones químicas de los componentes de la emulsión, brindando un gran poder energético y aplicable para taladros de grandes dimensiones.

Esta emulsión gasificada es sensibilizada en el momento justo del carguío del taladro, para ello se añaden sales especiales que definen la densidad final del producto, por lo que siempre debe de efectuarse muestreo de densidades durante el carguío de taladros. Para poder llegar a la densidad final se debe esperar entre 15 a 20 minutos luego del cual se obtendrá el esponjamiento deseado. Ver figura 12 y 13.



Figura 12. Medición de la densidad inicial en taza de la emulsión G.

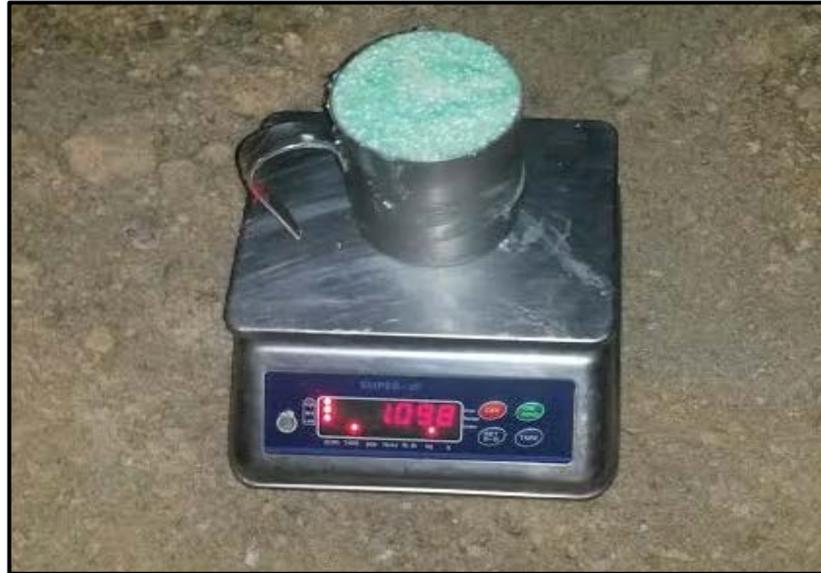


Figura 13. Medición de la densidad final luego de 20 min.

La columna explosiva final no debe permanecer más de 3 días en el taladro confinado ya que las burbujas de nitrógeno (Ver figura 14) podrían perder su tensión superficial y romperse dentro del taladro, produciendo la pérdida de esponjamiento y la posible insensibilización de toda la columna explosiva.

Densidad de taza: Es la densidad medida en una balanza calibrada mediante una taza de metal de 1.0lt de capacidad debidamente tarada. Esta densidad no es la densidad real dentro del taladro debido a un proceso de presión hidrostática que se explica en la sección 4.1. Sin embargo, sirve como referencia por su facilidad de medición.



Figura 14. Burbujas de nitrógeno en la emulsión G EXSA (2014). *Archivo de investigación.*

Las características técnicas de la emulsión gasificadas (Slurrex G) se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Ficha técnica de la emulsión G

Especificaciones Técnicas	Unidades	Slurrex G
Densidad	g/cm ³	1.35 ± 3%
Velocidad de Detonación	m/s	4 600 – 6 000
RBS (Potencia relativa al volumen)	%	120
Resistencia al agua	Hora	72

2.3.3.3. ANFO pesado

El ANFO pesado es una mezcla de emulsión base (a granel) con ANFO. Para su preparación se aprovechan los huecos intersticiales entre los prills de ANFO que pueden

ser ocupados por un explosivo líquido (Ver figura 15), como la emulsión, y que actúa como una matriz energética.

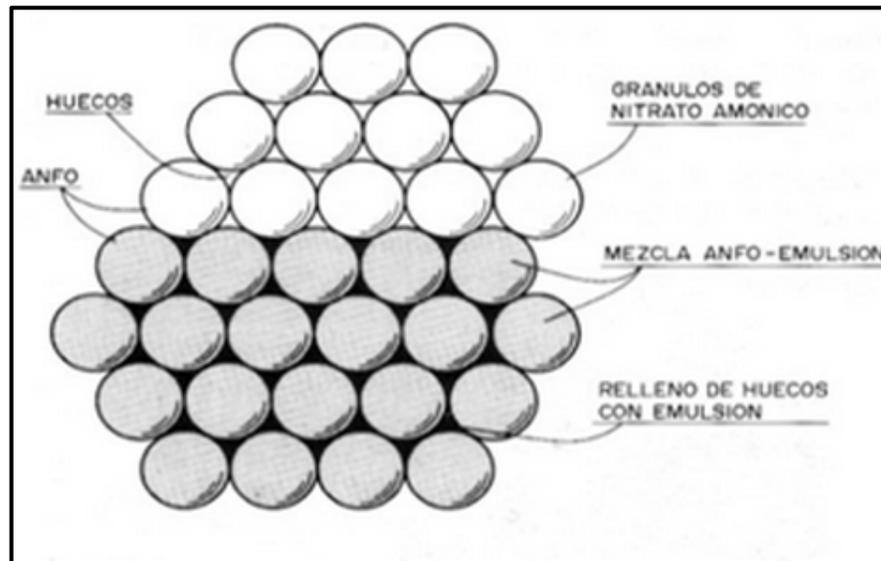


Figura 15. Estructura del ANFO pesado.
 Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades>

Aunque las propiedades de este explosivo dependen de los porcentajes de los componentes iniciales (ver figura 16), las ventajas principales que presentan son:

- Mayor energía que el ANFO.
- Mejores características de sensibilidad.
- Mejora su resistencia al agua a medida que incrementa la cantidad de emulsión en la mezcla.
- Posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del taladro.

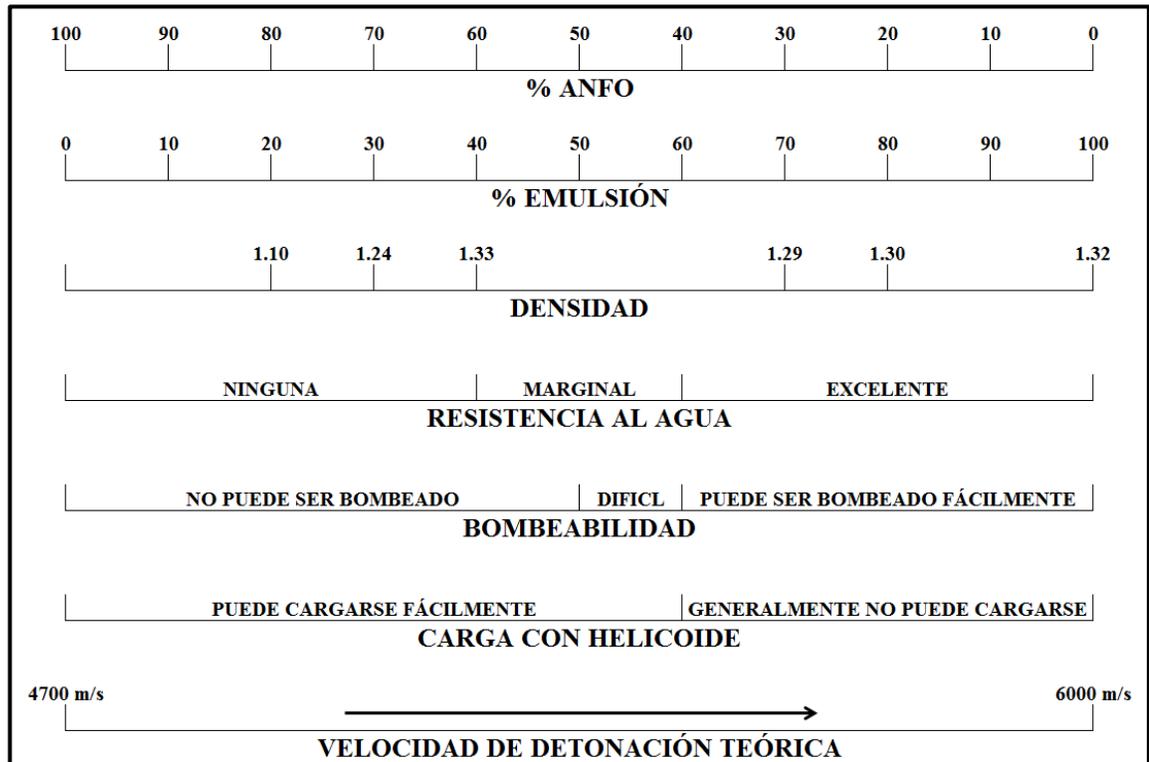


Figura 16. Variación de las propiedades del ANFO pesado con respecto al porcentaje de sus componentes.

Tomado de: <http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades>

La fabricación es relativamente fácil, pues la matriz emulsión puede ser preparada en una planta fija y transportada en un camión cisterna hasta un depósito de almacenamiento o ser bombeada a un camión mezclador. Con estos camiones pueden prepararse in-situ las mezclas de emulsión con ANFO según las condiciones del terreno.

En la figura 17 se muestra la variación de la potencia relativa en volumen (ANFO = 100) de un ANFO pesado en función del porcentaje de emulsión. Cuando la matriz de emulsión es superior al 40%, la potencia disminuye debido a que la separación de las

partículas de ANFO resulta muy elevada para que éstos actúen eficientemente como puntos calientes y propagadores de onda de choque.

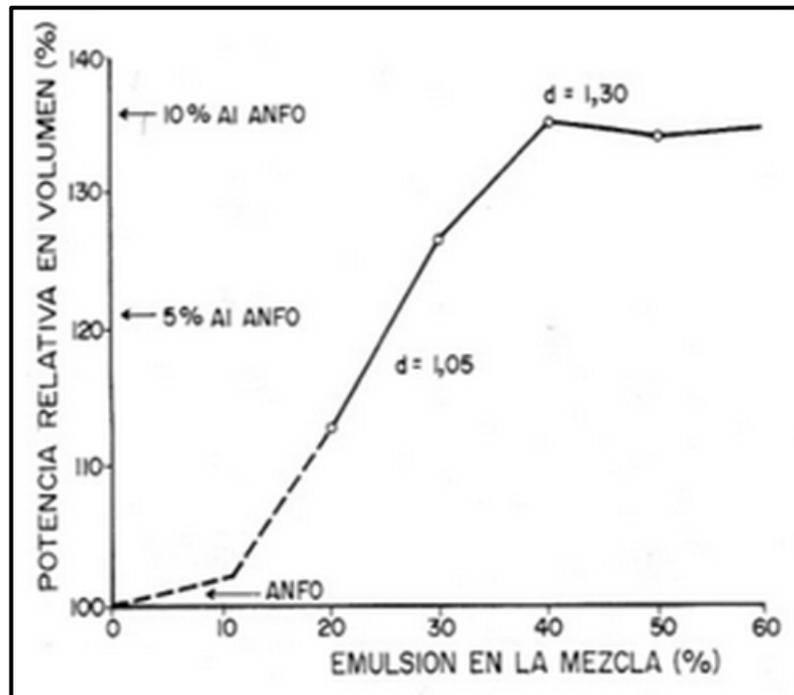


Figura 17. Variación de la potencia y densidad de un ANFO pesado según el porcentaje de emulsión.

Recuperado de: <http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades>

2.3.4. Características de los explosivos.

Seguridad.- Las emulsiones son sumamente seguras, no reaccionan a las pruebas de impacto y fricción estandarizadas para explosivos industriales, no se inician por el impacto de proyectiles y no detonan durante la quema a no ser que estén contaminadas con materiales extraños como dinamitas, polvo de aluminio o detonadores. En operaciones de

bombeo, se debe cuidar que las bombas no funcionen en seco o se tapone el sistema, en ambos casos la temperatura podría incrementarse hasta causar la detonación.

Velocidad de Detonación.- Está establecido que a menor tamaño de partícula de los ingredientes de un explosivo mayor será su velocidad de detonación (VOD). Como el tamaño de las gotas de las emulsiones es muy pequeño, la velocidad es muy alta- muy cerca de la teórica. La VOD decrece conforme el diámetro de carga disminuye o sólidos como aluminio o nitrato de amonio son adicionados, pero generalmente permanece alta comparada con dinamitas o geles explosivos.

Presión de Detonación.- Como las emulsiones tienen una gran velocidad de detonación y una razonable densidad, también como consecuencia de eso disponen de una relativamente alta presión de detonación. Las mediciones realizadas a diferentes tipos de emulsión, indican que la presión de detonación está entre 1000 y 1200 Mpa (100 y 120 Kbar) lo cual es particularmente apropiado para mejorar la fragmentación en rocas duras y para ser usadas como iniciador para ANFO.

Sensibilidad.- Las emulsiones tienen diferente grado de sensibilidad, desde las que son sensibles al fulminante No. 8 hasta las insensibles que requieren un cebo (booster) para su iniciación. La sensibilidad de las emulsiones es proporcionada por micro-esferas huecas de vidrio, agentes de gasificación química, perlita, plástico expandido o hasta los granos de Nitrato de Amonio. Dependiendo de la sensibilidad, las emulsiones pueden ser encartuchadas en diámetros que van desde 22,23mm hasta 177,8mm (7/8 hasta 4 pulgadas); la sensibilidad aumenta con la disminución de la densidad.

Resistencia al Agua.- La resistencia al agua de un explosivo es la capacidad de ser sumergido en agua y aún detonar en forma segura, confiable y precisa. Como la fase oleosa recubre a la solución, la emulsión es extremadamente resistente al agua y es la mejor opción cuando se encuentran taladros humedecidos o con agua porque ésta puede permanecer reposando bajo el agua por semanas o meses y mantiene un desempeño satisfactorio.

Diámetro Crítico.- Es el diámetro mínimo que debe tener la columna explosiva para que la reacción de detonación se propague en forma estable y completa.

En la tabla 6 se muestra la lista de rangos de VOD usados en MYSRL para las diferentes mezclas explosivas usadas (Los ANFOs pesados se realizan con emulsión TC y la emulsión pura es con emulsión G llevada a una densidad de $1,10 \pm 0,01$)

Tabla 6. Rangos de VOD para taladros de 10 5/8''.

Explosivo	Densidad (g/cm³)	VOD (m/s)	Diámetro crítico (pulgadas)
ANFO	0.81 ± 0.01	3800 – 4300	1.5
HA 37	1.03 ± 0.01	4800 – 5000	4
HA 46	1.19 ± 0.01	5000 – 5300	4
HA 55	1.29 ± 0.01	5200 – 5400	4
HA 64	1.33 ± 0.01	4500 – 4800	5
EMULSION	1.10 ± 0.01	5200 - 5400	2

Densidad Crítica.- Es una densidad por sobre la cual, o debajo de la misma, la sensibilidad de un explosivo, o su capacidad de detonación puede reducirse o puede resultar completamente dañada.

Los explosivos cuya sensibilidad depende de la saturación por gasificación química deben emplearse con el conocimiento de que el exceso de presión de agua o hasta del explosivo en sí, pueden llevar a que se exceda la densidad crítica al fondo del taladro. (ISEE (2008). *Manual del Especialista en Voladura*, 17va Edición)

La densidad crítica para la emulsión gasificada se encuentra por encima de $1,25 \text{ g/cm}^3$ y por debajo de $0,90 \text{ g/cm}^3$, según I&D EXSA S.A. La figura 18 muestra la variación de la densidad dependiendo de la altura de carga para un ejemplo de mina al nivel del mar.

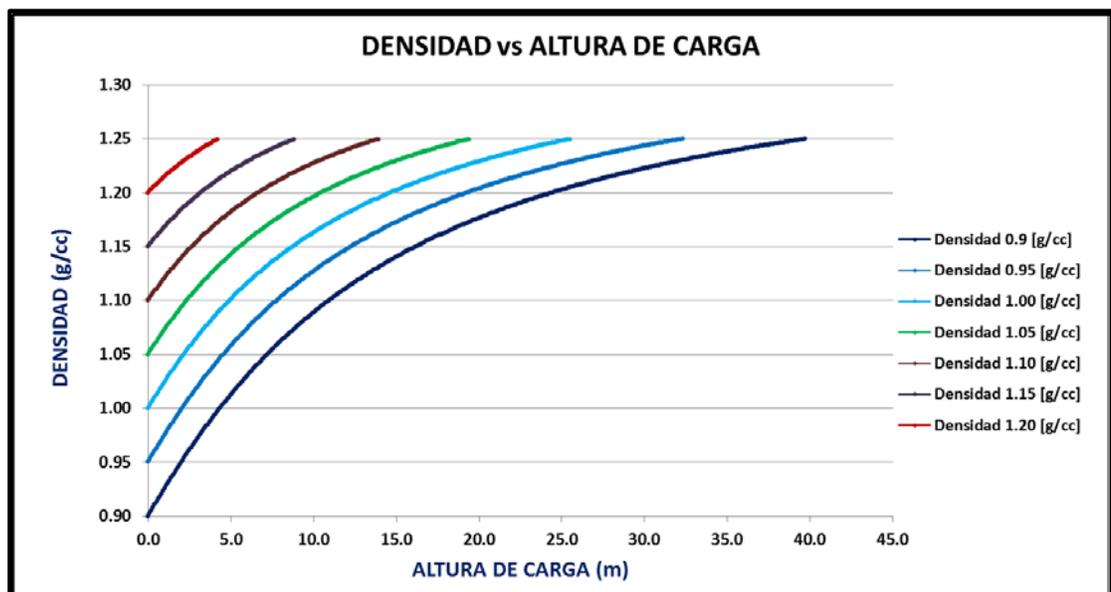


Figura 18. Variación de densidad respecto a altura de carga. EXSA (2014). *Advance analysis gasified explosives*.

2.4. DISEÑO DE CARGAS EXPLOSIVAS Y SECUENCIA DE DISPARO

El diseño de las cargas explosivas en MYSRL está muy relacionado al diseño de la malla de perforación (Burden y Espaciamiento), así como a los resultados de los ensayos realizados al detritus producto de la perforación (leyes de Au, Cu, Ag y alteración litológica) ya que estos últimos determinarán el destino de las rocas a ser disparadas. Para ello se ha diseñado la siguiente secuencia lógica para el diseño de cargas explosivas y secuencia de disparo. (Tabla 7).

Tabla 7. Secuencia lógica para el diseño de cargas explosivas

PASO	ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDAD
1	Propósito de la voladura	Se determina el objetivo principal de realizar una voladura en una zona determinada, así como el requerimiento de la granulometría final producto del disparo.
2	Propiedades del macizo rocoso	El estudio del macizo y sus propiedades nos brindará información relevante para el diseño de la malla de perforación y la carga explosiva.
3	Altura de banco y diámetro del taladro	Existe una estrecha relación entre la altura de banco y el diámetro a usar. En MYSRL se tienen solo bancos de 10m y 12m por lo que los diámetros son de 9 7/8'' y 10 5/8'' respectivamente.
4	Sub – Drill (SD)	Dependiendo de la dureza de la roca en MYSRL se estila colocar SD entre -1m (para suelos) y +1.5m (Rocas con presencia de sulfuros e ISRM 5)
5	Longitud del taco	Ésta se obtiene usando la fórmula del SD (Frank Chiappetta, <i>Scale Depth of Burial Calculation</i>)
6	Tipo de explosivo	El tipo de explosivo dependerá principalmente del tipo de alteración de la roca intacta, grado de fracturamiento (Clasificación ISRM), presencia de agua, etc.

7	Densidad del explosivo	Aprovechando la propiedad de la emulsión gasificada es posible definir a que densidad llevar el explosivo.
8	Burden y espaciamiento	Para su definición se sigue el diagrama de flujo expuesto en la Figura 8.
9	Secuencia de iniciación	Dependiendo de la ubicación de la voladura y de estructuras cercanas de cuidado, se define si la iniciación será de manera pirotécnica (Nonel) o electrónica.
10	Retardo y secuencia de la voladura	Finalmente se define el amarre a realizar y los tiempos de retardos entre taladros y entre filas.

Algunos ejemplos de cargas explosivas y diseños de amarre se muestran entre las figuras 19 y la figura 22.

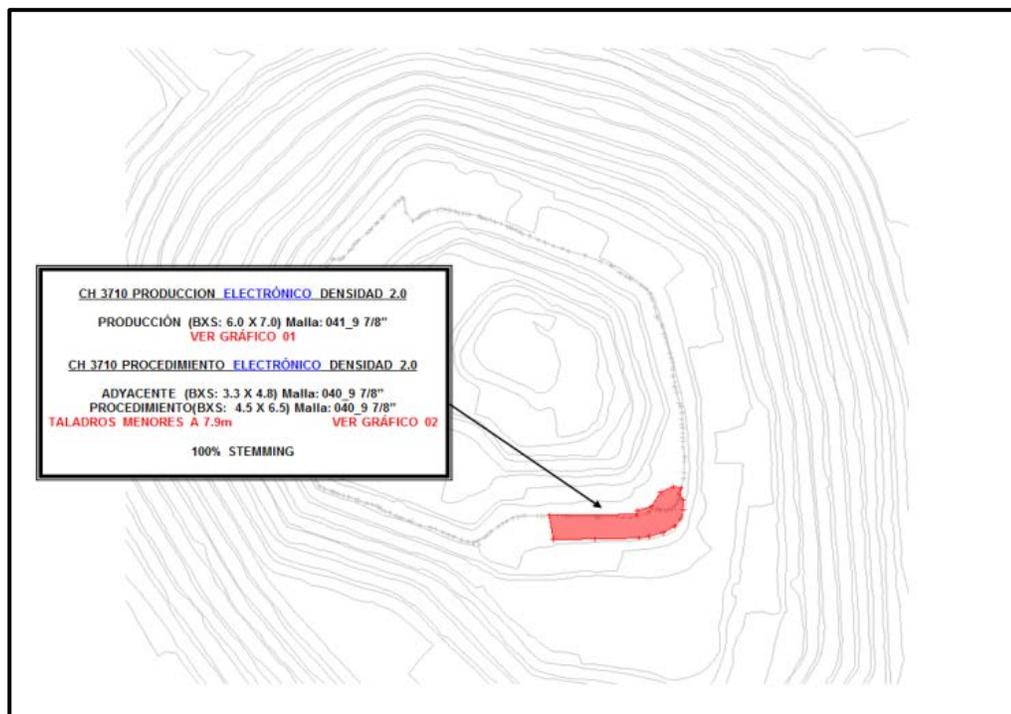


Figura 19. Ubicación del proyecto a ser disparado.



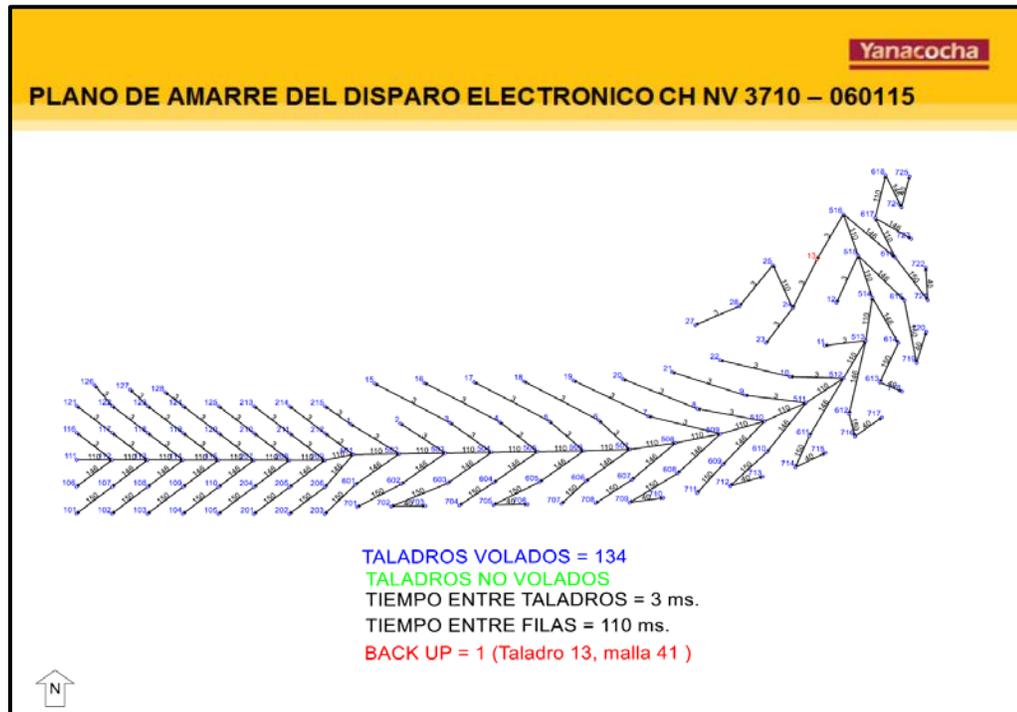


Figura 22. Diseño de amarre electrónico con cuidado de pared

Mallas de perforación y diseño de carga

En el área de perforación y voladura en MYSRL, a inicios de año, se formula las mallas de perforación establecidas por tipo de material para los diferentes tajos operativos en el año en mención, este manual es llamado “CookBook”. Estas mismas no han sido cambiadas para las pruebas comparativas de emulsión G (100%) y mezclas explosivas de ANFO pesado. En la tabla 8 se muestran las mallas establecidas para el 2015 para los tajos operativos.

Tabla 8. “Cookbook” de mallas de perforación para el 2015.

TAPADO OESTE PIT (Bench = 12m)						
Rock Type	Drilling Pattern					
	Subdrill (m.)	Hole Length (m.)	Stemming (m.)	Hole Dia. (inch.)	Burden (m.)	Spacing (m.)
Soft	-1.0	-1.0	7.0	10 5/8	7.00	11.00
Medium	1.0	1.0	6.0	10 5/8	7.50	8.50
Hard	1.5	1.5	6.0	10 5/8	7.50	8.50

CERRO NEGRO PIT (Bench = 10m)						
Rock Type	Drilling Pattern					
	Subdrill (m.)	Hole Length (m.)	Stemming (m.)	Hole Dia. (inch.)	Burden (m.)	Spacing (m.)
Soft	0.0	0.0	6.0	9 7/8	8.00	9.00
Medium	1.0	1.0	6.0	9 7/8	7.00	8.00

YANACocha PIT (Bench = 10m)						
Rock Type	Drilling Pattern					
	Subdrill (m.)	Hole Length (m.)	Stemming (m.)	Hole Dia. (inch.)	Spacing (m.)	Burden (m.)
Soft	0.0	0.0	7.0	10 5/8	8.00	14.00
Medium	0.0	0.0	7.0	10 5/8	8.00	14.00
Hard	1.5	1.5	6.0	10 5/8	6.00	7.00
Very Hard	1.5	1.5	5.5	10 5/8	6.00	7.00

CHAQUICOCHA PIT (Bench = 10m)						
Rock Type	Drilling Pattern					
	Subdrill (m.)	Hole Length (m.)	Stemming (m.)	Hole Dia. (inch.)	Burden (m.)	Spacing (m.)
Soft	1.0	1.0	6.0	10 5/8	7.50	8.50
Medium	1.0	1.0	6.0	10 5/8	7.50	8.50
Hard	1.5	1.5	6.0	10 5/8	7.50	8.50
Hard	1.5	1.5	6.0	10 5/8	7.50	8.50

CAPITULO III. EMULSIÓN GASIFICADA

3.1. INTRODUCCIÓN

La reciente introducción de explosivos gasificadas, en nuestro caso de estudio la emulsión gasificada (Emulsión G), como alternativa de reducción de costos globales en las operaciones y protección del medio ambiente en el proceso de la voladura en la industria minera, hace necesario conocer los beneficios y restricciones de uso de estos productos para su óptima aplicación.

Tradicionalmente, las emulsiones han sido definidas como dispersiones de gotas macroscópicas de un líquido en otro líquido, con diámetros de gotas de aproximadamente entre 0.5-100 μm . Un gran número de emulsiones consisten realmente de solo dos líquidos. La estabilidad de este simple sistema es fácil de entender desde el punto de vista teórico. Sin embargo uno debe darse cuenta que muchas de las formulaciones de las emulsiones usadas en la práctica son más complejas.

Este hecho hizo que la Unión Internacional de Químicos Puros y Aplicados (IUPAC”, por sus siglas en inglés) formulará la siguiente definición para la emulsión:

“En una emulsión las gotas de líquido y/o cristales líquidos están dispersas en otro líquido”.

Una emulsión es formada cuando dos líquidos inmiscibles (Agua y aceite) son mecánicamente agitados. Durante la agitación, ambos líquidos tienden a formar gotas, pero cuando la agitación cesa, las gotas se separan en las dos fases iniciales. Si un componente estabilizador, que es un emulsificador, es añadido a los dos líquidos inmiscibles, éste hace que una fase llegue a ser la fase continua y la otra permanezca en forma de gotas por un tiempo prologando. Las gotas son formadas por ambas fases al momento de la agitación y la fase continua es obtenida debido a que sus gotas son inestables.

Las emulsiones pueden ser encontradas en muchas formas. Las emulsiones simples están compuestas de gotas de aceite dispersas en una fase acuosa (O/W), mientras que emulsiones altamente concentradas están hechas de gotas de una fase acuosa dispersas en una fase continua de aceite (W/O). Esta última es la más común para desarrollar emulsiones explosivas. (Ver figura 23)

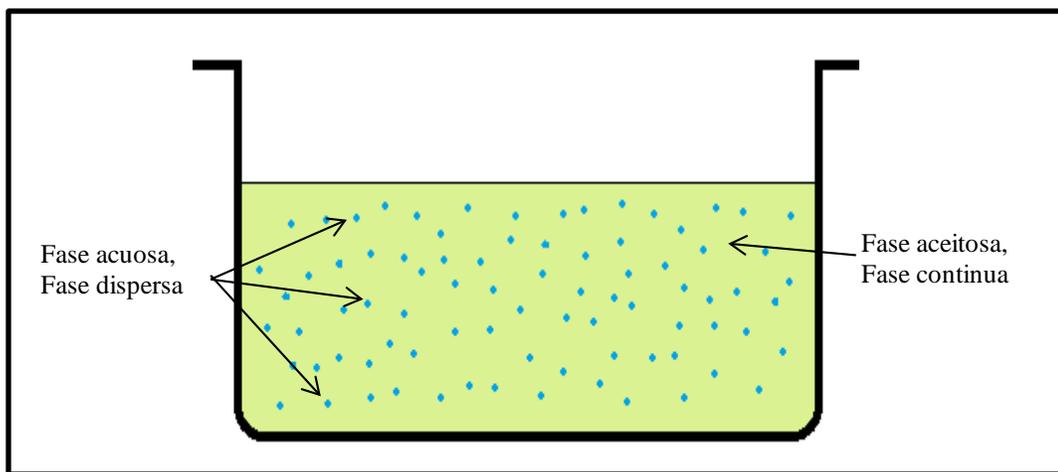


Figura 23. Conformación de las fases de la emulsión W/O

3.2. ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES

Las emulsiones son mezclas de líquidos inmiscibles meta-estables que en cierto momento pierden estabilidad con el paso del tiempo. Por lo tanto la preparación de la emulsión es el reto de formular un sistema lo suficientemente estable para satisfacer las demandas particulares en un lapso de tiempo. La estabilidad y las características físicas de la emulsión dependen de muchas variables incluyendo la naturaleza de los líquidos inmiscibles, temperatura, cantidad y tipo de aditivos y la cantidad de energía química o mecánica usada para formar la emulsión.

La inestabilidad de la emulsión puede ser prevenida y los emulsificantes o estabilizadores son productos claves para producir la estabilidad de éstas. El emulsificante es un término general que refiere al producto químico que ocupa la región interfacial entre las gotas de la fase dispersa y la fase continua. Los emulsificantes tienen dos funciones principales: Reducir la tensión interfacial y proveer estabilidad coloidal de las gotas.

Para lograr la estabilidad, los emulsificantes necesitan cubrir la superficie de las gotas completamente y permanecer firmemente adsorbido. La cantidad de emulsificantes necesario depende del tamaño de las gotas, la eficiencia de la emulsión y la composición de las dos fases.

3.3. PRODUCTOS DE LA EMULSIÓN EXPLOSIVA Y CALORES DE FORMACIÓN

Como ya se mencionó líneas arriba las emulsiones están formadas por una mezcla de líquidos inmiscibles y ciertos productos emulsificantes que ayudan a estabilizar los líquidos primarios. Estos productos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Calores de formación y balance de oxígeno de la emulsión gasificada

Nº	Fórmula Empírica	Nombre comercial	W (g/mol)	ΔH_f Q de formación (KJ / mol)	Balance de Oxígeno (B.O)
1	NH ₄ NO ₃	Nitrato de Amonio (AN)	80	353.46	+20
2	NaNO ₃	Nitrato de Sodio (SN)	85	462.27	+47.1
3	H ₂ O	Agua	18	-	-
4	C ₂₂ H ₄₄ O ₆	SPAN – 80 (Emulsificante)	428	-	-239.2
5	C ₁₂ H ₂₆	Diesel	170	392.88	-348.2

3.4. BALANCE DE OXÍGENO Y CALOR DE EXPLOSIÓN

La proporción de productos usados para formular la emulsión harán que los resultados varíen drásticamente, pudiendo ocasionar insensibilizar el explosivo así como producir gases nocivos producto de la voladura por falta de oxígeno. Por ello es necesario balancear la ecuación y calcular el volumen de gases producidos, así como el calor de explosión. En la tabla 10 se muestra la proporción ideal de componentes (Ming Lu y Qifa Liu (2008)) para la emulsión gasificada y su balance de oxígeno.

Tabla 10. Balance de oxígeno ideal

Formulación ideal (Ming Lu*, Qifa Liu)					
Componente	Fase Acuosa			Emulsificante	Fase Combustible
	Nitrato de Amonio	Nitrato de Sodio	Agua	Span-80	Aceite mineral
Fórmula	NH ₄ NO ₃	NaNO ₃	H ₂ O	C ₂₂ H ₄₄ O ₆	C ₁₂ H ₂₆
Proporción	0.76	0.078	0.1	0.02	0.042
B.O. de la sustancia	20	47.1	0	-239.3	-348.2
B.O. por sustancia	15.2	3.6738	0	-4.786	-14.6244
B.O.	-0.537				

Ming L. y Quifa L. (2008). *A novel mathematical model of formulation design of emulsion explosive.*

En la tabla 11 se detalla la variación en el balance de oxígeno y en el del calor de explosión para ligeras variaciones de los componentes principales (Ming Lu y Qifa Liu (2008))

Tabla 11. Balance de oxígeno de la emulsión y calores de explosión para diferentes proporciones de los componentes base.

Porcentaje en masa por componente (%)					Balance de Oxígeno	Calor de explosión KJ / Kg
AN	SN	H ₂ O	SPAN	DIESEL		
77	7	10.0	2.0	4.0	-0.017	3187.5
77	7.5	9.3	2.0	4.2	- 0.478	3195.6
76	7.8	10.0	2.0	4.2	- 0.537	3144.2
75.3	9	9.5	1.7	4.5	- 0.438	3161.0

El balance de oxígeno se ve afectado principalmente por la variación en la proporción del diesel en la mezcla, pudiendo ocasionar menor calor de explosión y mayor volumen de gases nocivos producto de la voladura. La figura 24 muestra la relación entre el balance de oxígeno (η) con el calor de explosión y el volumen de gases.

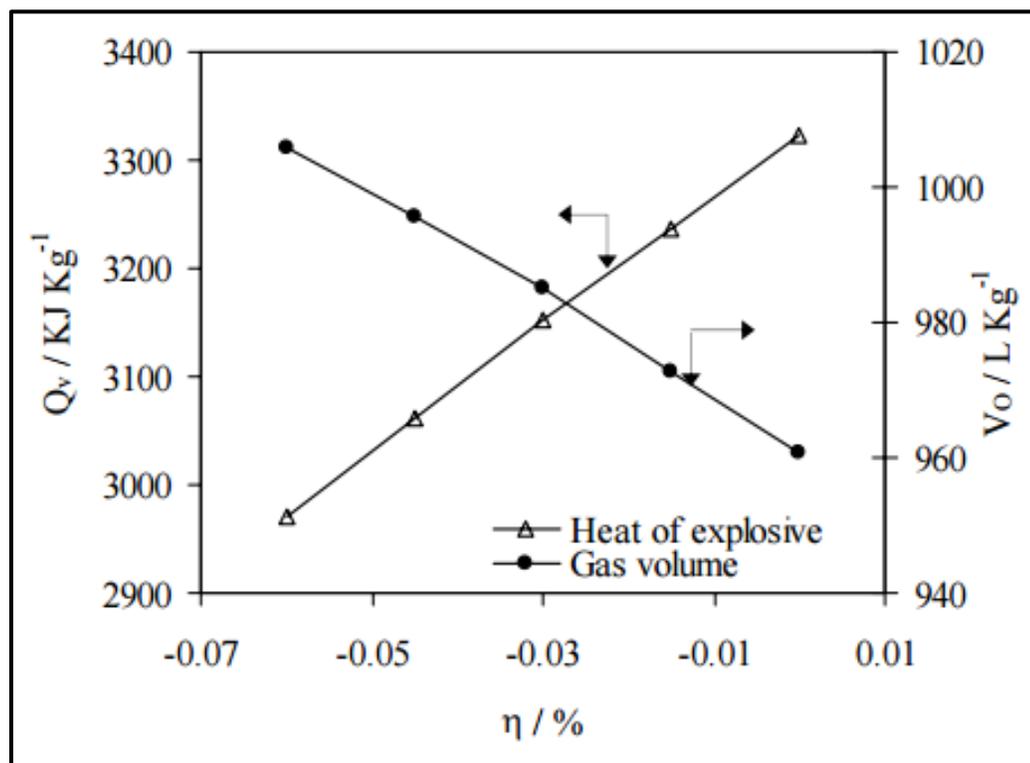
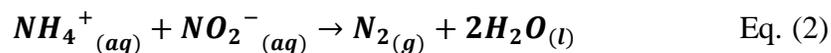


Figura 24. Efecto del balance de oxígeno en el calor de explosión y el volumen de gases teóricos

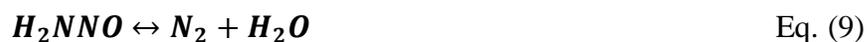
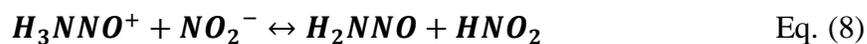
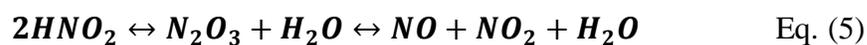
Ming L. y Quifa L. (2008). *A novel mathematical model of formulation design of emulsion explosive.*

3.5. REACCIÓN QUÍMICA EN LA EMULSIÓN GASIFICADA

La reacción cinética del NH_4NO_3 y NaNO_2 ha sido estudiada ampliamente. A pesar de la complejidad del proceso de reacción, la reacción puede ser simplificada como se muestra en la fórmula anterior.



La cinética de la reacción requiere una cantidad detallada de varias reacciones específicas dentro del mecanismo de reacción y es descrito en detalle debajo. Es notable indicar que varios de los reactivos específicos dentro del mecanismo de reacción son sensibles al pH, especialmente el NH_3 y en HNO_2 . El mecanismo de reacción es como sigue:



El resultado de la ecuación 9 muestra la formación de gas nitrógeno N_2 , el cual sirve para aumentar el volumen de la mezcla, reducir la densidad y generar puntos calientes que mejoran los resultados de la voladura.

3.6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA EMULSIÓN GASIFICADA

La emulsión gasificada es un explosivo formado por una solución microscópica oxidante dispersa en una fase combustible continua y estabilizada por un Emulsificante. Las características técnicas de este explosivo se detallan en la tabla 12.

Tabla 12. Características técnicas de la emulsión G de EXSA

EMULSION G	UNIDAD	VALOR
Densidad antes de gasificar	g/cm ³	1.35 ± 3%
Densidades posibles luego de gasificar	g/cm ³	0.80 – 1.20
Viscosidad de la emulsión	cP	13000
Velocidad de detonación	m/s	4600 – 6000
Presión de detonación	MPa	4800 - 9100
Energía	KJ / Kg	2554
Volumen normal de gases	l/kg	1020
Potencia relativa en peso (comparado con ANFO)	%	70
Potencia relativa en volumen (comparado con ANFO)	%	120
Resistencia al agua		EXCELENTE
Diámetro crítico	mm	76
Tiempo de espera en taladros	días	7

3.7. SISTEMA DE INYECCIÓN DE NITRITO DE SODIO

La inyección de nitrito de sodio a las emulsiones gasificadas al momento de cargar el taladro con los camiones mezcladores origina una reacción química en solución que es mostrada líneas arriba. Los efectos del pH y la temperatura se muestran en la figura 25.

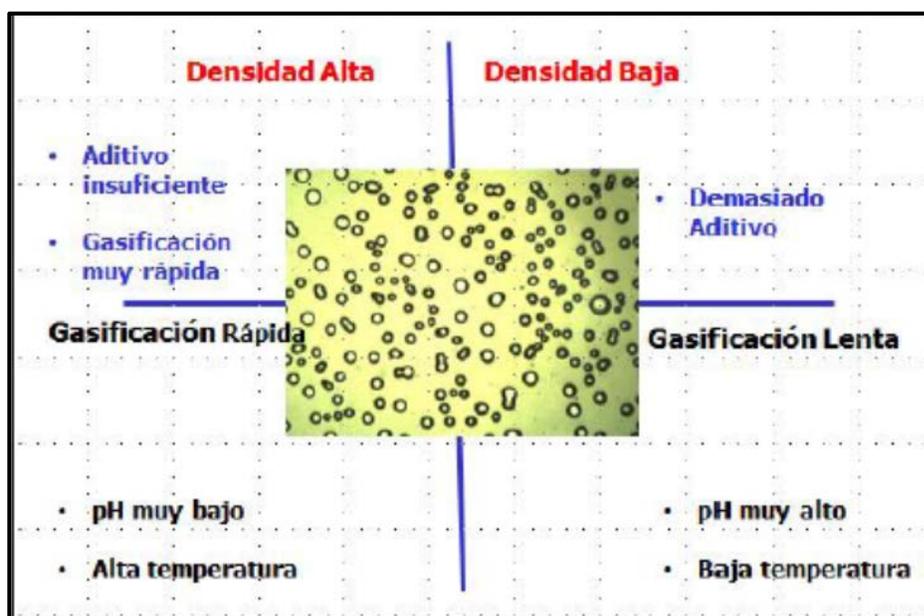


Figura 25. Efectos del pH y la temperatura en el proceso de gasificación.
 Recuperado de: <http://www.congresominas.co.pe/WEB/ti/2/10/10c.pdf>

El proceso de gasificación debe estabilizarse a los 20 minutos después de mezclar la emulsión con el nitrito de sodio. Una gasificación muy rápida podría generar que las burbujas de nitrógeno ($N_{2(g)}$) no tengan la tensión superficial adecuada para mantener las burbujas estables y comiencen a romperse al contacto con los otros componentes de la emulsión, por lo que la emulsión gasificada podría desensibilizarse y deflagrar al momento del disparo.

Es por ello que en MYSRL se han instalado sistemas de inyección de nitrito de sodio a los camiones mezcladores (figura 26) para medir y controlar la cantidad suficiente y necesaria que permita lograr la densidad final de taza diseñada por el área de P&V.



Figura 26. Sistema de control para la inyección de nitrito de sodio.

Actualmente en MYSRL, los camiones mezcladores poseen dos sistemas diferentes de carguío de taladros; uno vaciable (figura 27) que entrega la mezcla explosiva por un brazo telescópico colocado en la parte delantera del camión a un caudal entre 200 y 250 kg / min y el sistema bombeable (figura 28), que entrega la mezcla explosiva mediante una bomba mezcladora a un ritmo de 70 a 90 kg/min. El sistema bombeable es usado únicamente para taladros con presencia de agua mayor a 2,0m dentro del taladro.



Figura 27. Sistema vaciable de carguío de explosivos.



Figura 28. Sistema bombeable de carguío de explosivos usado solo para taladros con agua.

CAPITULO IV. EVALUACIÓN TÉCNICA

4.1. EFECTO DE LA PRESIÓN HIDROSTÁTICA EN LA COLUMNA EXPLOSIVA

La presión generada en cada punto dentro de la columna explosiva es igual al resultado de la suma de la presión atmosférica, la presión generada por el taco y la columna explosiva superior al punto en mención. (Ver Figura 29)

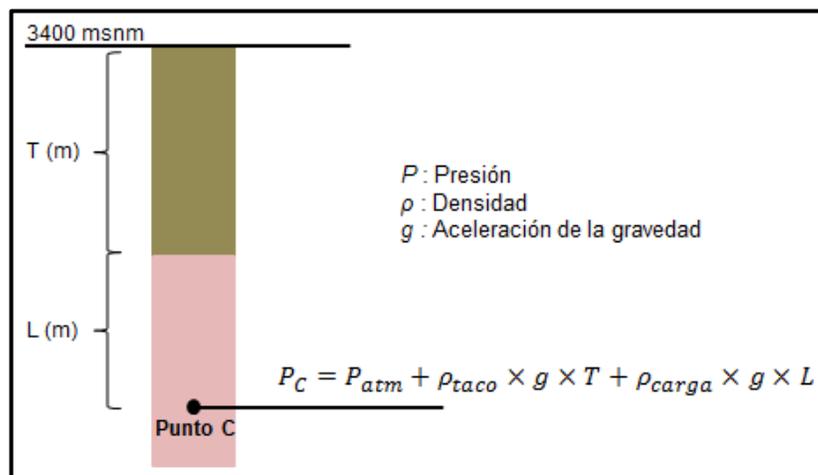


Figura 29. Cálculo de la presión en un punto dentro de la columna explosiva

La emulsión, al ser una mezcla de líquidos inmiscibles, es propensa a ser comprimido (por consiguiente a tener una mayor densidad que la registrada en una balanza por medio de una taza) dependiendo de la presión que ejerza el peso sobre la carga explosiva. Se han realizado pruebas en donde se compara la densidad de taza con la densidad promedio de la columna de explosivo calculada a partir del esponjamiento final luego de 20min para taladros de 10 5/8'' de diámetro, altura de carga de 6m y profundidad del taladro de 12m. El método de cálculo se grafica en la figura 30, los resultados se muestran en la figura 31.

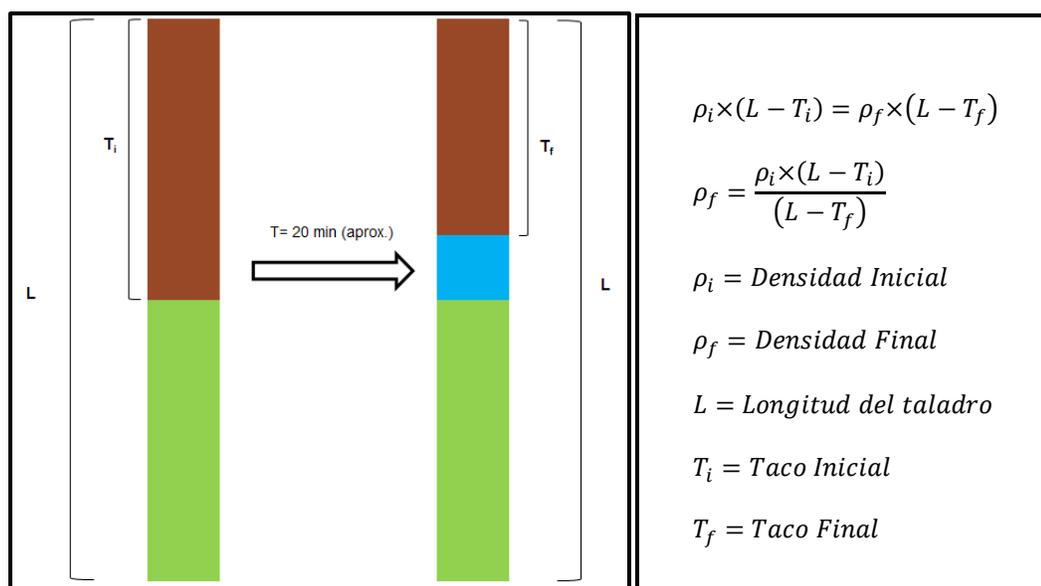


Figura 30. Cálculo de la densidad promedio real de la columna explosiva luego del esponjamiento.

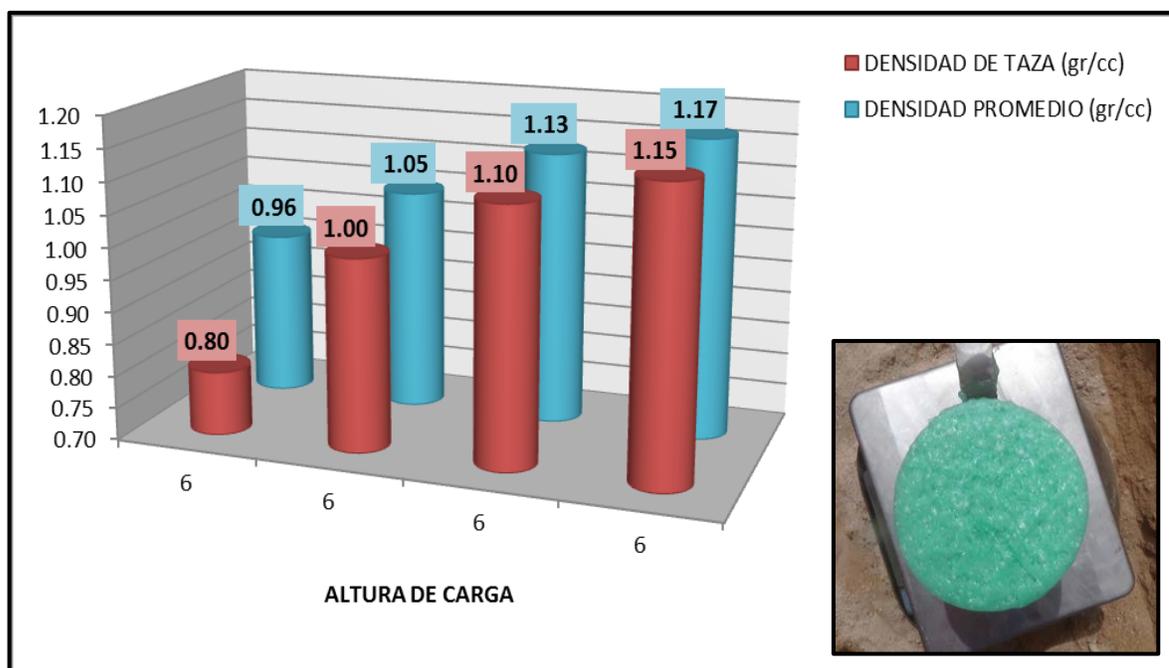


Figura 31. Densidad de taza y la densidad promedio dentro del taladro

Con estos datos es importante tener en cuenta la densidad a la que se llega en el fondo del taladro para evitar superar la densidad crítica del explosivo expuesta en la sección 2.3.4. y tener problemas de sensibilización dentro de la columna explosiva.

4.2. LA VELOCIDAD DE DETONACIÓN PARA LA EMULSIÓN G

Conociendo la relación directa entre la velocidad de detonación (VOD) y la presión de detonación producto de la explosión de una columna explosiva:

$$P_{Det} (Pa) = 0.25 \times VOD^2 \times \rho \quad \text{Eq. (10)}$$

P_{Det} : Presión de Detonación (Pa)

VOD: Velocidad de detonación (m/s)

ρ : Densidad final del explosivo (kg/m^3)

Podemos proponer que al tener velocidades de detonación mayores con explosivos de menor densidad en MYSRL, la presión de detonación resultante será la misma que las producidas por explosivos convencionales como el ANFO pesado que se usa en MYSRL actualmente.

Durante la etapa de prueba del uso en producción de la emulsión G 100% se realizaron 9 pruebas de VOD para diferentes densidades tratando de simular VODs equivalentes a las mezclas de ANFO pesado con emulsión TC.

Los resultados de VOD se muestran en la figura 32. y en la tabla 13 se muestran las densidades de taza equivalentes entre emulsión G y ANFO pesado con emulsión TC.

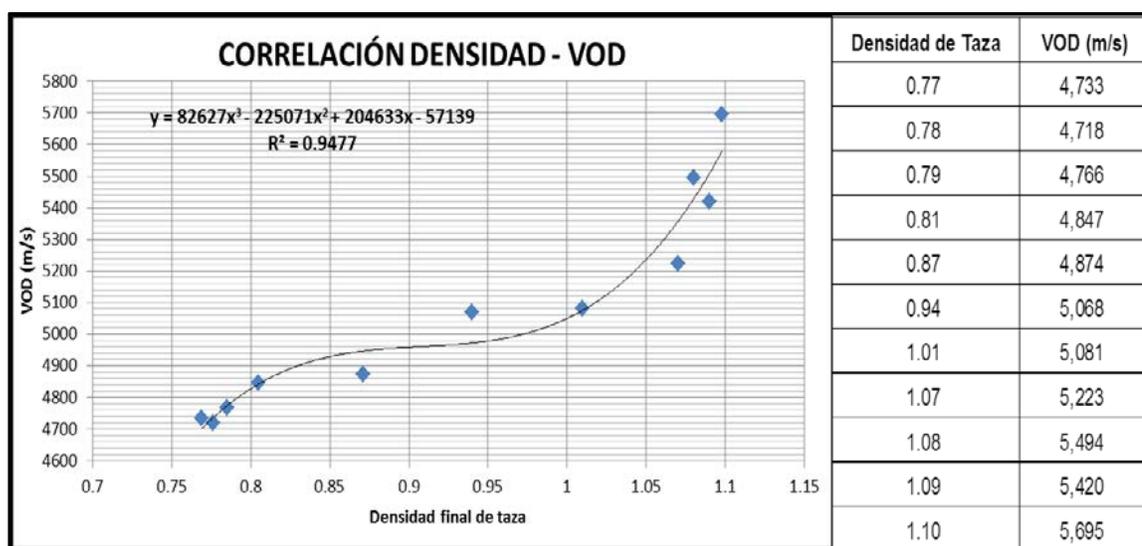


Figura 32. Correlación entre densidad de taza y VOD para la emulsión gasificada.

Tabla 13. Densidad final de taza para la emulsión G y VOD equivalentes al ANFO pesado.

Densidad final de taza (g/cm ³)	VOD (m/s)	Esponja (m/m)	HA EQUIV.	VOD (m/s)	Densidad HA (g/cm ³)
0.80	4000 - 4500	0.40	ANFO	3800 – 4300	0.81
1.00	5000 - 5200	0.30	HA 37	4800 – 5000	1.05
1.10	5200 - 5500	0.20	HA 46	5000 – 5300	1.19
1.15	4700 - 5100	0.15	HA 64	4500 – 4800	1.29

Con estos resultados de VOD para la emulsión gasificada, podemos obtener presiones de detonación equivalentes a los ANFOs pesados del cuadro superior, con lo que garantizaríamos mejoras en la fragmentación (mayor VOD) con menor cantidad de explosivo por taladro (menor densidad)

4.3. COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE ANFO PESADO Y EMULSIÓN G

En la tabla 14 se detalla las principales diferencias técnicas y económicas, así como las ventajas ecológicas de la emulsión gasificada.

Tabla 14. Comparación cualitativa de la emulsión G y el ANFO pesado.

EMULSIÓN G	ANFO PESADO
<p>Genera burbujas de nitrógeno mediante una reacción química, produciendo explosivos de densidad variable.</p>	<p>Emulsión que no reacciona químicamente y mantiene una densidad constante.</p>
<p>Es más resistente al agua para cualquier tipo de densidad final.</p>	<p>Para que sea resistente al agua debe componerse de una mezcla HA 64 con una densidad de 1.29 g/cm³.</p>
<p>Al tener una emulsión con densidades variables, el contacto con el agua no afecta la calidad del explosivo y no genera gases nitrosos al momento de la voladura.</p>	<p>Al contacto con el agua, para mezclas con porcentajes de emulsión menores a 60%, produce gases nitrosos al momento de la voladura. (B.O positivo)</p>
<p>Es posible encontrar densidades equivalentes que brinden los mismos resultados en VOD para ANFOs pesados generados a partir emulsión TC.</p>	<p>Los ANFOs pesados generados a partir de esta emulsión no pueden ser llevados a otras densidades y tienen restricciones para su detonación en taladros con agua.</p>

4.4. RESULTADOS DE TASAS DE EXCAVACIÓN

Luego de realizar las pruebas respectivas de medición de velocidad de detonación (VOD) se midieron los KPIs de voladura y carguío en dos tajos dentro de MYSRL y se midieron las tasas de excavación por polígono de los equipos de carguío presentes en cada tajo.

En el tajo Cerro Negro se hicieron dos comparaciones para materiales de similar alteración litológica:

- Entre el ANFO y la emulsión G a densidad $0,8 \text{ g/cm}^3$ (para el argílico)
- Entre el HA 37 (con emulsión TC) y la emulsión G a densidad $1,0 \text{ g/cm}^3$ (para el argílico avanzado)

En el tajo Tapado Oeste se hicieron dos comparaciones:

- Entre el HA 46 (con emulsión TC) y la emulsión G a densidad $1,1 \text{ g/cm}^3$ (Para la sílice masiva)

Para el caso del tajo Cerro Negro se tuvo una pala hidráulica Hitachi 5500 EX, los resultados fueron como se muestran en las figuras 33 y 34.

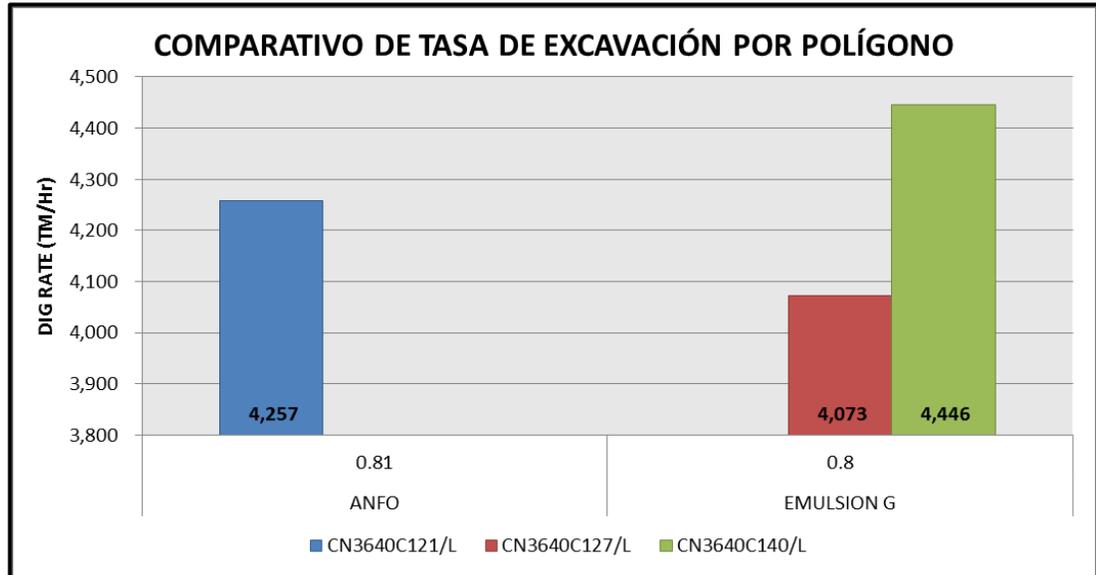


Figura 33. Tasa de excavación para el ANFO y la emulsión G a densidad 0.80.

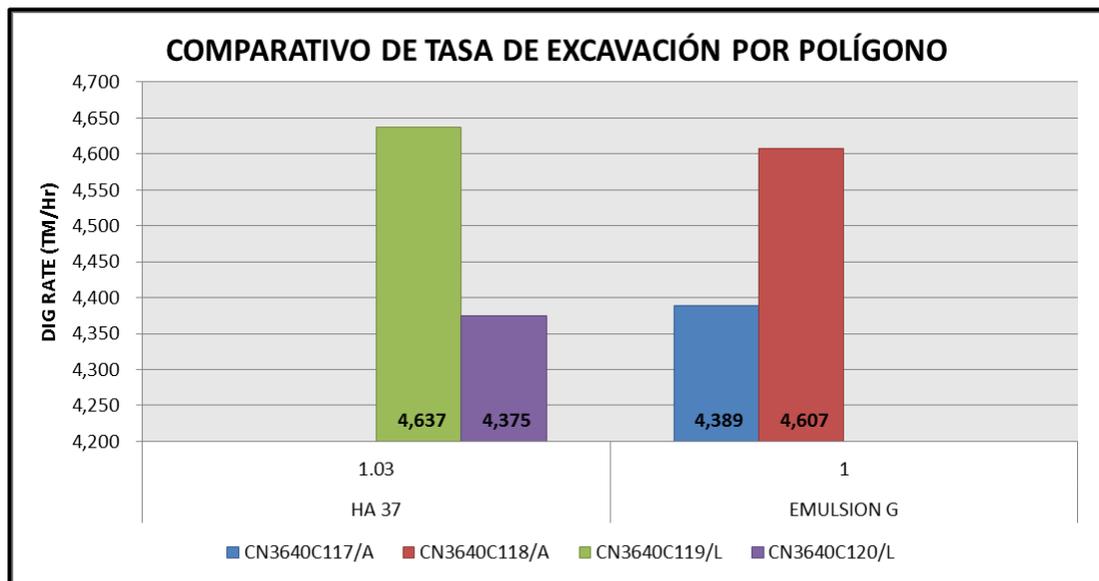


Figura 34. Tasa de excavación para el HA37 y la emulsión G a densidad 1.00.

Para el caso del tajo Tapado Oeste se tuvo una pala hidráulica Hitachi 2500 EX, los resultados fueron como se muestra en la figura 35.

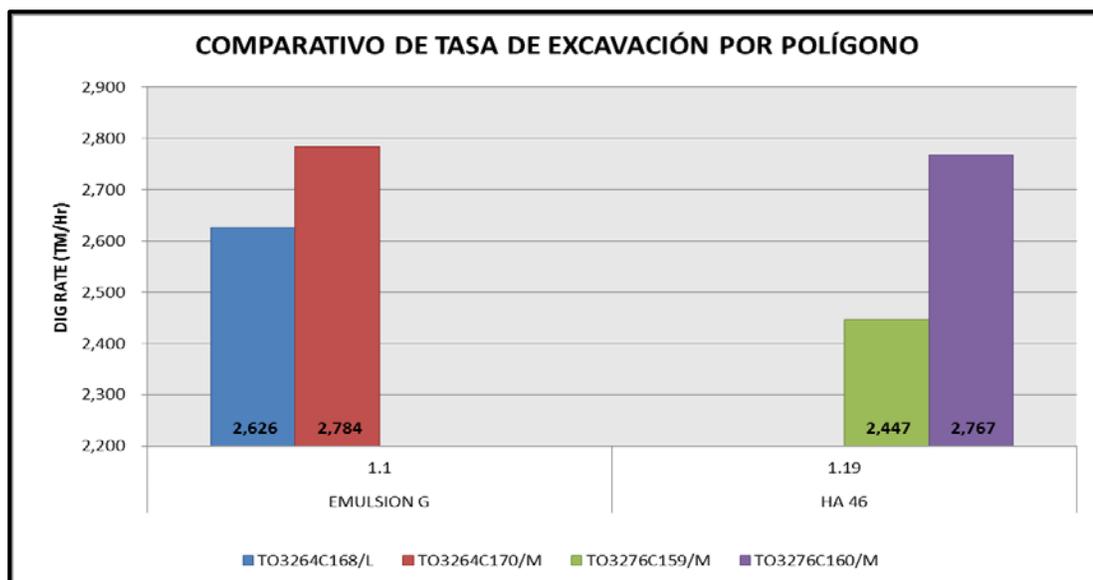


Figura 35. Tasa de excavación para el HA46 y la emulsión G a densidad 1.10.

Con estos resultados podemos demostrar que no hay cambios significativos en la tasa de excavación de los equipos de carguío y que, por ende, el cambio entre ANFOs pesados realizados con emulsión TC a emulsión G al 100% con densidades variables es justificado.

4.5. ANÁLISIS DE FRAGMENTACIÓN COMPARATIVO

En un disparo realizado en la fase 02 del tajo Tapado Oeste, se separaron dos zonas con diseño de carga diferente, manteniendo la misma malla de perforación en zonas con similar alteración litológica; una zona se cargó con HA46 y la otra con emulsión G al 100% a densidad de diseño final de 1,10 g/cm³. Luego del disparo, se realizaron pruebas de fragmentación con ayuda del software WipFrag[®] y una esfera de 11.4'' de diámetro usada como rango patrón, en ambos frentes para evaluar la granulometría promedio en ambas zonas. Las zonas y los puntos monitoreados se muestran en la figura 36.

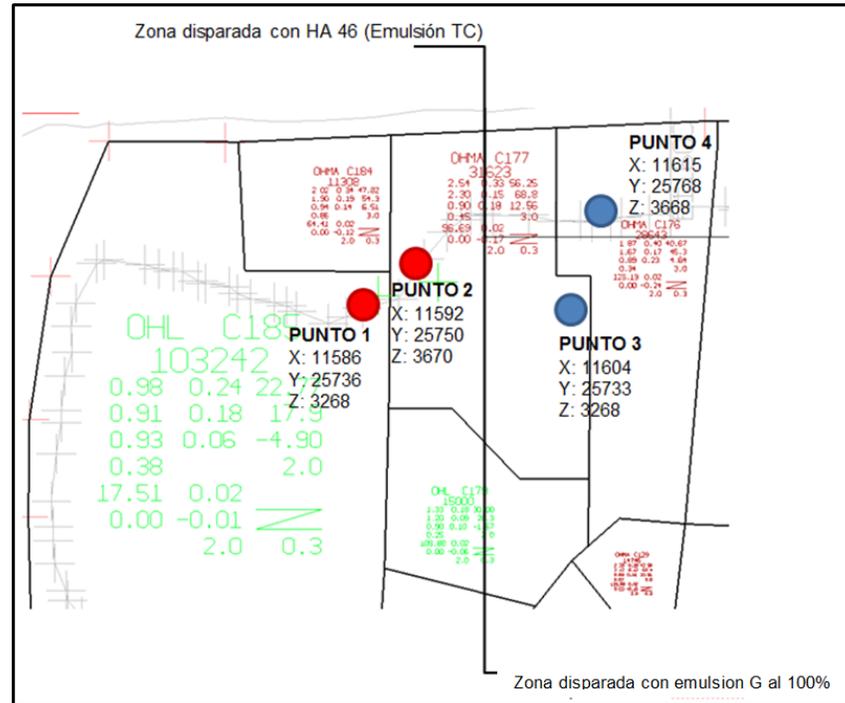


Figura 36. Zonas y puntos monitoreados en el disparo en TO.

El resultado de análisis combinado de fragmentación de los puntos 1 y 2 se muestra en la figura 37 y las fotos de estos puntos se muestran en la figura 38. (Diámetro de la esfera = 11.4'')

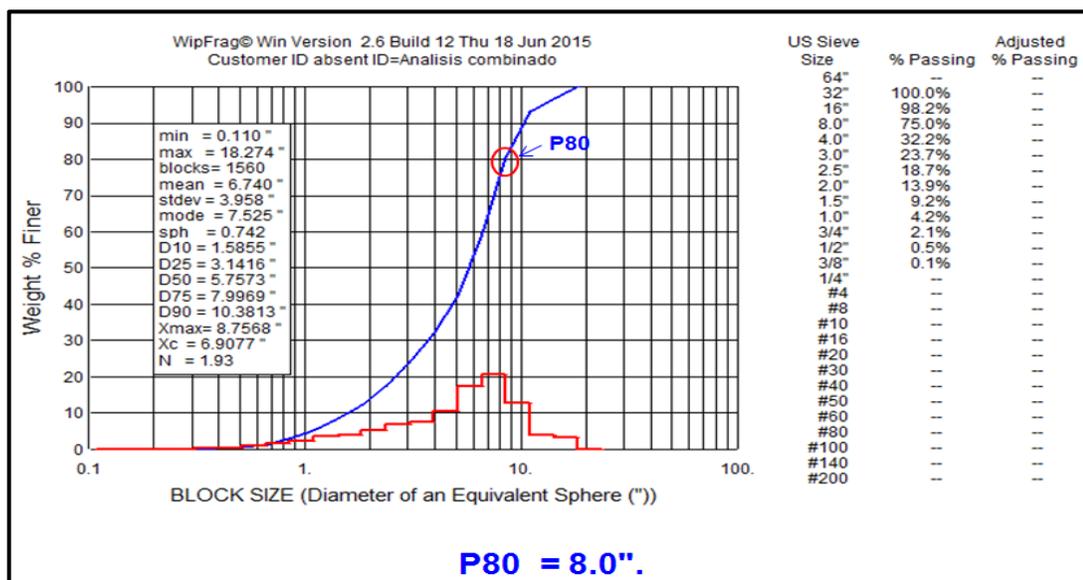


Figura 37. Análisis combinado en la zona disparada con HA 46

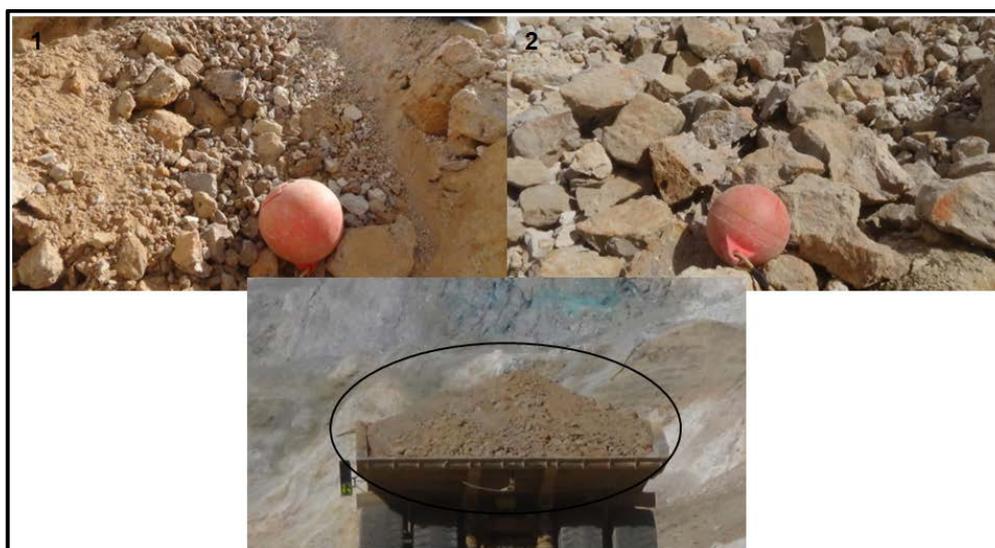


Figura 38. Fotos de los puntos 1 y 2 y muestra de camión cargado.

El resultado de análisis combinado de fragmentación de los puntos 3 y 4 se muestra en la figura 39 y las fotos de estos puntos se muestran en la figura 40.

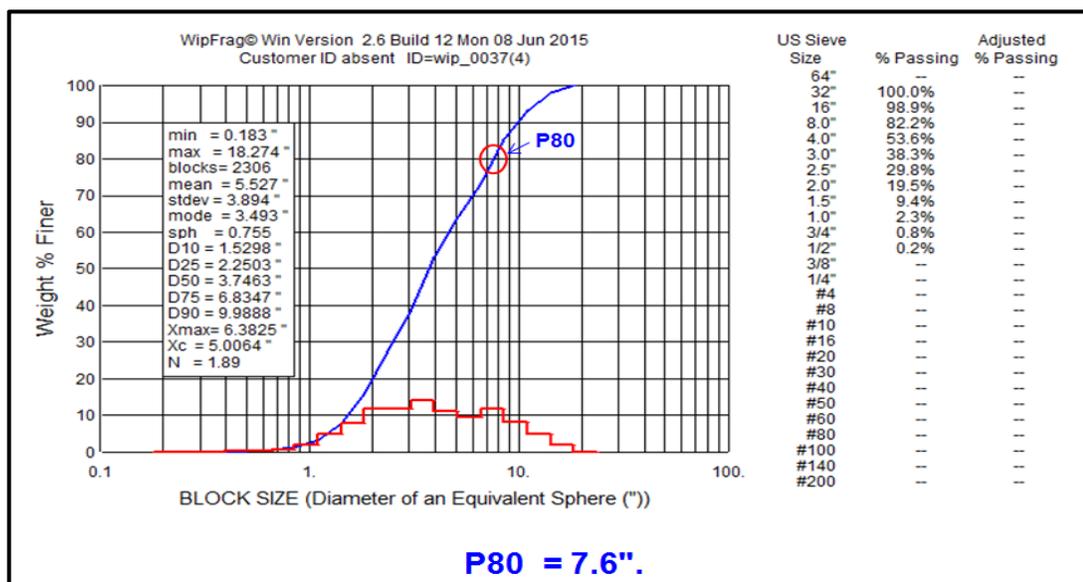


Figura 39. Análisis combinado en la zona disparada con emulsión G a densidad 1.10



Figura 40. Fotos de los puntos 3 y 4 y muestra de camión cargado.

Como se puede ver en los resultados y las fotos, no existen diferencias significativas en el tamaño de los fragmentos producidos por el disparo realizado con HA46 y Emulsión

G al 100%, además de que en ambos casos se cumplió con el requerimiento granulométrico solicitado por la planta de Gold Mill.

La malla de producción para estas zonas fueron diseñadas con BxE = 6,5m x 7,5m para ambas zonas y el diseño de carga fue como se muestra en la figura 41.

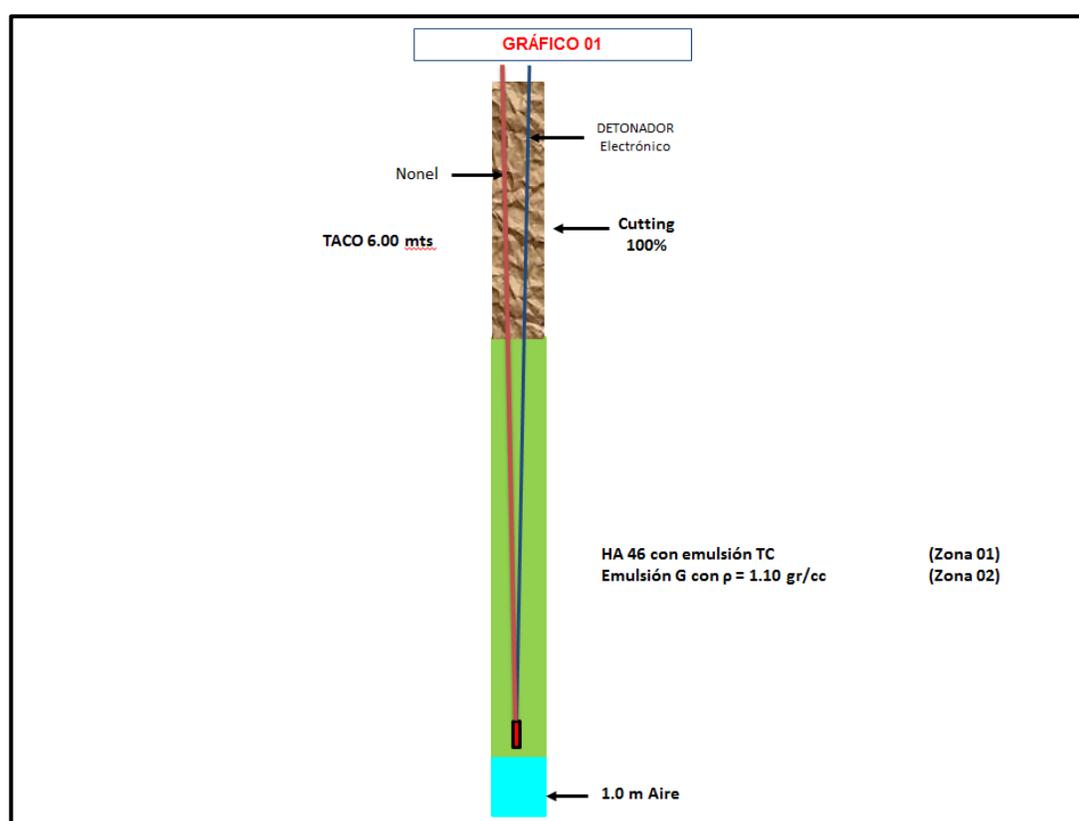


Figura 41. Diseño de carga zonificado para la prueba de fragmentación.

CAPITULO V. EVALUACIÓN ECONÓMICA

5.1. PRECIO DE AGENTES Y ACCESORIOS DE VOLADURA

Con lo expuesto en el capítulo IV, se comprobó la equivalencia de VODs entre los explosivos formados con emulsión G (100%) y los ANFOs pesados formados a partir de emulsión TC, además de demostrar que los resultados de fragmentación y las tasas de excavación de los equipos de carguío no se ven afectados por el cambio de agentes de voladura.

En la tabla 15 se muestra el costo de la emulsión G, emulsión TC y ANFO equivalentes para MYSRL. Este es un costo equivalente al real ya que, por política de la empresa, no se puede publicar los costos de contrato. Hay que aclarar que estos costos varían trimestralmente según el acuerdo pactado entre el proveedor EXSA y MYSRL.

Tabla 15. Precios unitarios de agentes de voladura

AGENTE	DENSIDAD DE FÁBRICA (g/cm ³)	COSTO (\$/TM)
ANFO	0.81 ± 3%	673.56
EMULSION TC	1.32 ± 3%	531.03
EMULSION G	1.35 ± 3%	576.39

Los explosivos y accesorios de voladura usados en su mayoría en MYSRL son los que listan en la tabla 16 junto a su respectivo costo equivalente.

Tabla 16. Precios unitarios de accesorios y explosivos primarios

EXPLOSIVOS Y ACCESORIO	UNIDAD	PRECIO (\$)
Booster	UN	4.15
Det. Electrónico	UN	26.61
Det. Pirotécnico	UN	2.80
Separador de gravilla	UN	3.81
Cámara de aire con vástago	UN	7.86
Bolsa de aire	UN	10.59

5.2. COMPARATIVO DE COSTOS POR TALADRO

Con los datos de costos unitarios de los productos principales, se han realizado cuatro gráficos comparativos en modelo de carga, densidades de taza y costos para la emulsión G y las los ANFOs pesados realizadas con emulsión TC para el tajo tapado oeste, con alturas de bancos de 12m, brocas de 10 5/8'' de diámetro y diseño con 1.0m de subdrill.

A estos costos se le han añadido los costos de accesorios de voladura como el detonador electrónico, detonador pirotécnico, booster de 1lb, taponex para ANFO pesado con emulsión TC y explodeck para emulsión G – ambos como parte de un proyecto de cámaras de aire dentro del taladro- y separador de gravilla (usado exclusivamente en emulsión G para evitar la contaminación de la emulsión para densidades menores o iguales a 1.0), etc. (Ver. figura 42 al 45)

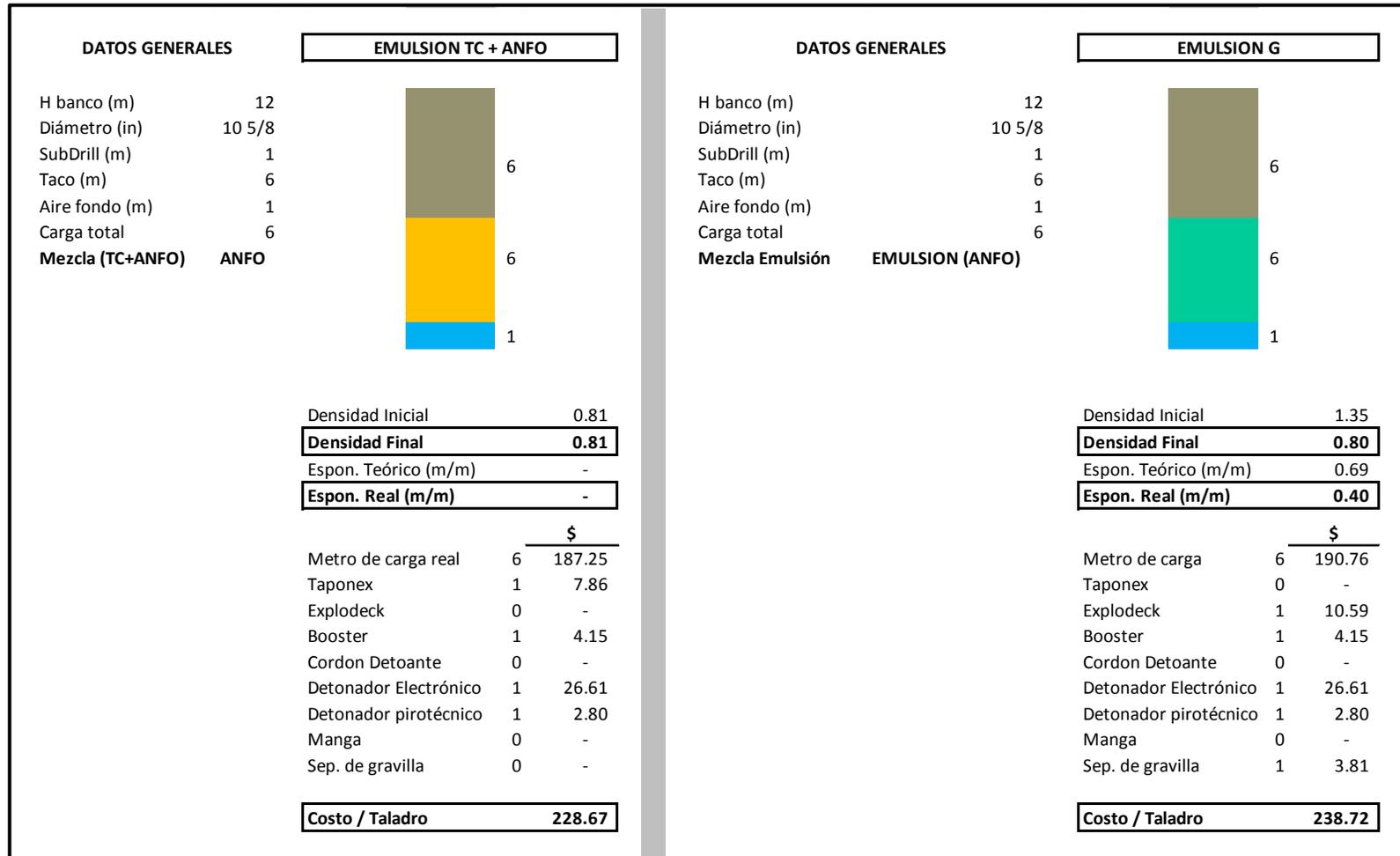


Figura 42. Costos por taladro entre el ANFO y la emulsión G ($D=0.8 \text{ g/cm}^3$)

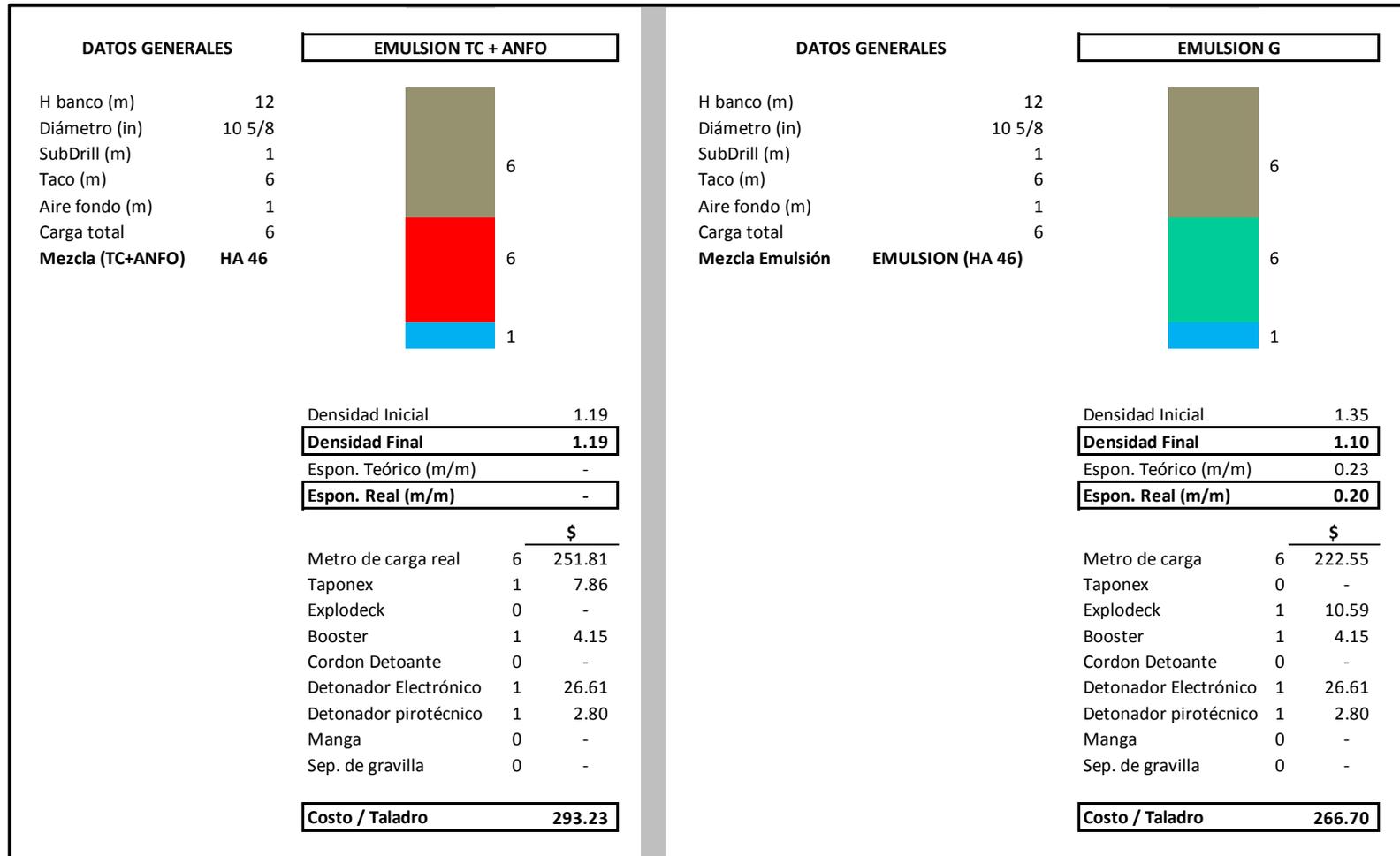


Figura 44. Costos por taladro entre el HA46 y la emulsión G ($D=1.10 \text{ g/cm}^3$)

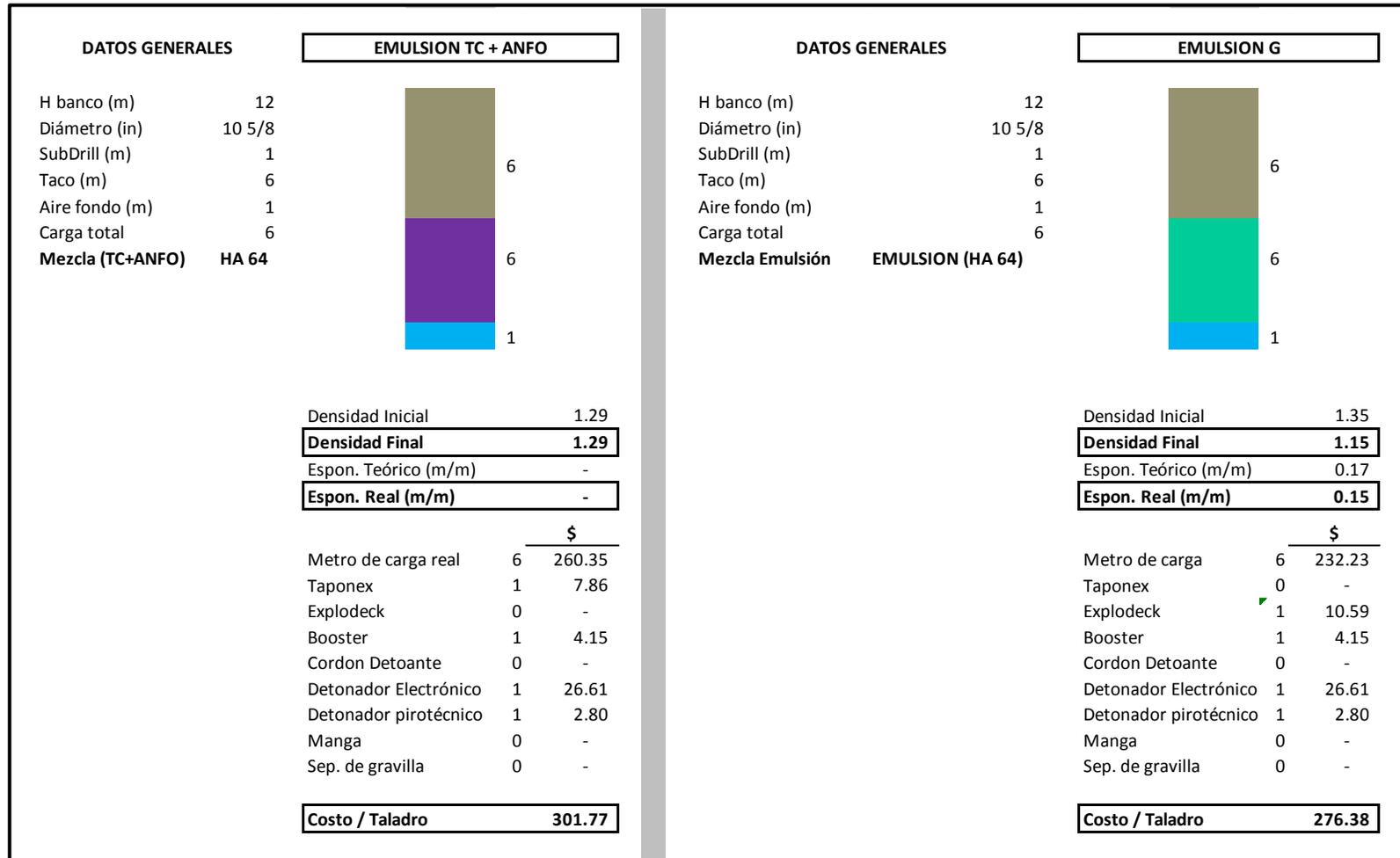


Figura 45. Costos por taladro entre el HA 64 y la emulsión G ($D=1.15 \text{ g/cm}^3$)

En la figura 46 se muestra un resumen los costos y ahorros calculados de las comparaciones realizadas en los gráficos superiores para un ejemplo de taladro en Tapado Oeste con broca de 10 5/8'' y 1,0m de subdrill.



Figura 46. Costos por taladro de emulsión G, ANFO pesado y ahorros calculados.

Con todo lo expuesto en los gráficos superiores podemos concluir que la emulsión G puede reemplazar a los ANFOs pesados formados a partir de la emulsión TC tales como el HA 37, HA 46 y HA 64; sin embargo, la emulsión G llevada a la densidad de $0,8 \text{ g/cm}^3$ (la mínima a la que se puede llegar debido a su densidad crítica) no puede reemplazar al ANFO ya que esto generaría pérdidas económicas.

5.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

5.3.1. Densidad equivalente

Con la tendencia mostrada en la Figura 46, es posible encontrar una densidad en la cual el costo por taladro para la emulsión G y el ANFO pesado resulten idénticos. En la figura 47 se muestra las tendencias de los costos por taladro a diferentes densidades para la emulsión G y el ANFO pesado manteniendo las consideraciones de altura de banco, diámetro de taladro, altura de carga y los accesorios usados por taladro para cada tipo de explosivo.

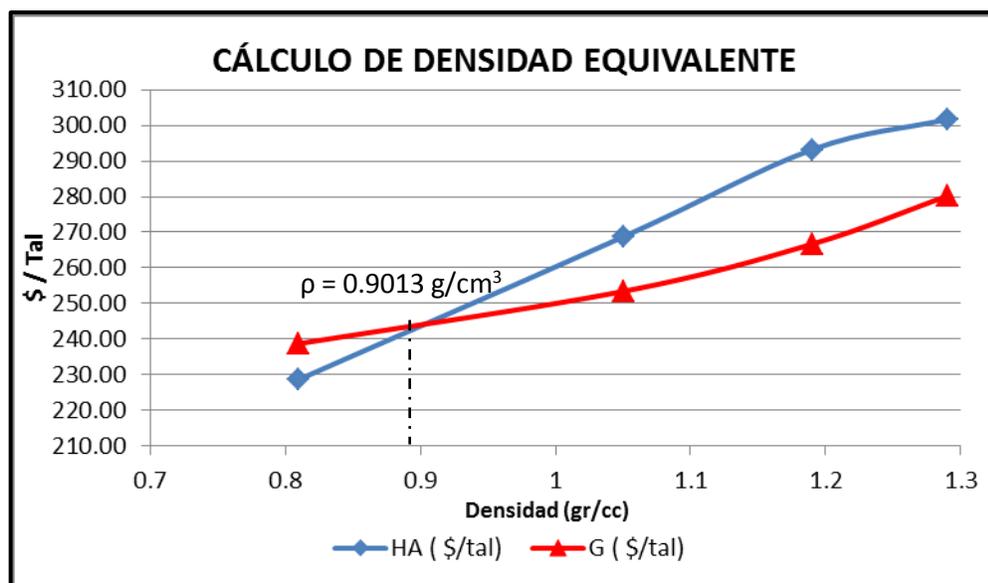


Figura 47. Tendencia lineal ($R > 0.95$) del costo por taladro respecto a la densidad

Considerando que los valores de los costos por taladro siguen una tendencia lineal ($R > 0.95$), se puede calcular que la densidad de equilibrio será de $0,9013 \text{ g/cm}^3$, por lo que densidades menores de ésta generarán pérdidas económicas.

5.3.2. Altura de carga equivalente

Debido al costo que generan los accesorios de voladura en el costo por taladro (costos fijos), es necesario calcular la altura de carga equivalente para cada densidad final de la emulsión G y su equivalente en ANFO pesado, de tal manera de calcular la altura de carga mínima necesario para hacer económico el reemplazo propuesto. La figura 48 muestra un ejemplo para el HA 37 y su equivalente en emulsión G a densidad final de taza de 1,0 g/cm³.

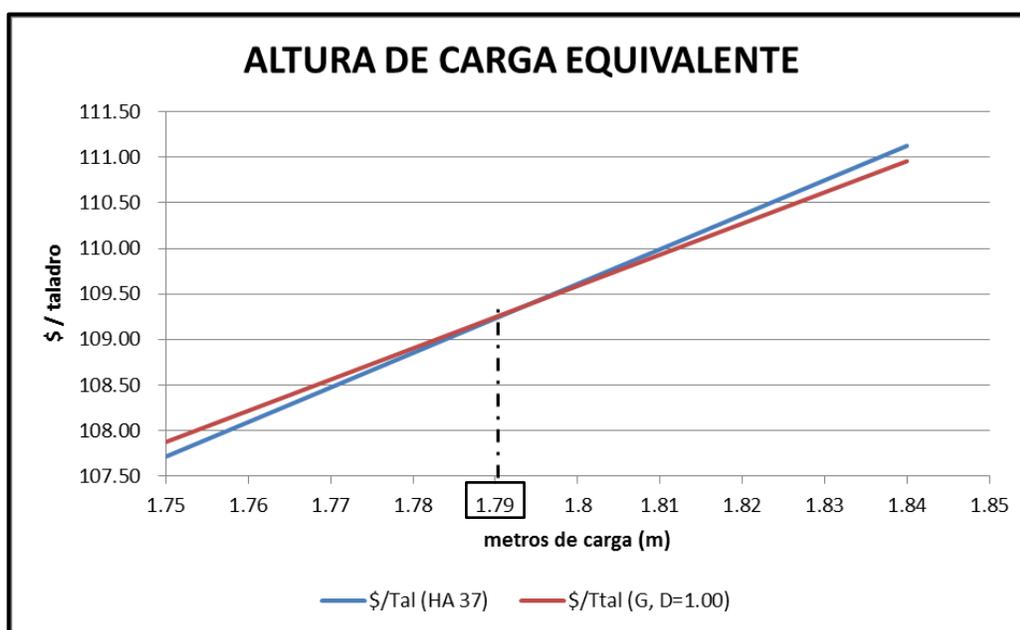


Figura 48. Altura de carga equivalente para el HA37 en taladros de 10 5/8''

En la tabla 17 se muestra la altura de carga equivalente para las demás mezclas explosivas de ANFO pesado y su equivalente en emulsión G.

Tabla 17. Altura de carga equivalente entre emulsión G y ANFO pesado

ANFO pesado	Densidad (g/cm³)	Densidad Eq. en emulsión G (g/cm³)	Altura de carga equivalente (m)
HA 37	1.05	1.00	1.79
HA 46	1.19	1.10	1.34
HA 64	1.29	1.15	1.39

CAPITULO VI. BENEFICIOS ECONÓMICOS

6.1. ASPECTOS GENERALES

Con los datos mostrados en el capítulo III, IV y V se demuestra que es técnica, ecológica y económicamente factible reemplazar los ANFOs pesados usados ampliamente en MYSRL por la emulsión gasificada usada al 100% en cada taladro a diferentes densidades. El detalle para taladros de 10 5/8'' de diámetro, altura de banco de 12m y 6m de carga, se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Ahorro por taladro para cada tipo de mezcla equivalente

ANFO pesado	Densidad (g/cm ³)	Costo por taladro (\$/tal)	Densidad final de taza de emulsión G	Costo por taladro (\$/tal)	Ahorro (\$/tal)
HA 37	1.05	268.74	1.00	253.39	15.35
HA 46	1.19	293.23	1.10	266.70	26.52
HA 64	1.29	301.77	1.15	280.19	25.39

Los reemplazos del HA37 y HA46 se dan de manera vaciable para terrenos con dureza media y media-dura respectivamente. En el caso del HA64, el reemplazo será efectuado de manera bombeable solo en terrenos con presencia de agua mayor a 2,0m por taladro.

6.2. PROYECCIÓN DE MINADO Y CONSUMO DE EXPLOSIVO

La proyección presupuestada de toneladas a minar, el consumo de ANFO y emulsión TC para los años 2015-LOM se muestra en la figura 49.

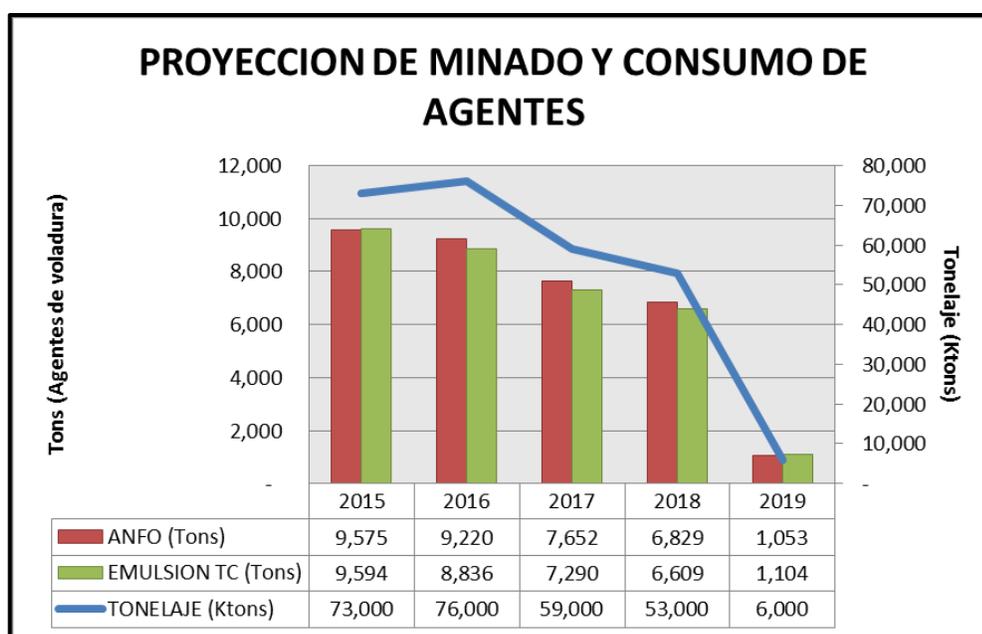


Figura 49. Proyección de consumo con datos similares al presupuesto del 2015

Sin embargo, si realizamos el cambio de las mezclas explosivas desarrolladas a partir de la emulsión TC como el HA 37, HA 46 y HA 64 por la emulsión G pura (100%) según la tabla 13, tendríamos que el consumo de ANFO y emulsión G para los años 2015 – LOM sería igual al mostrado en la figura 50.

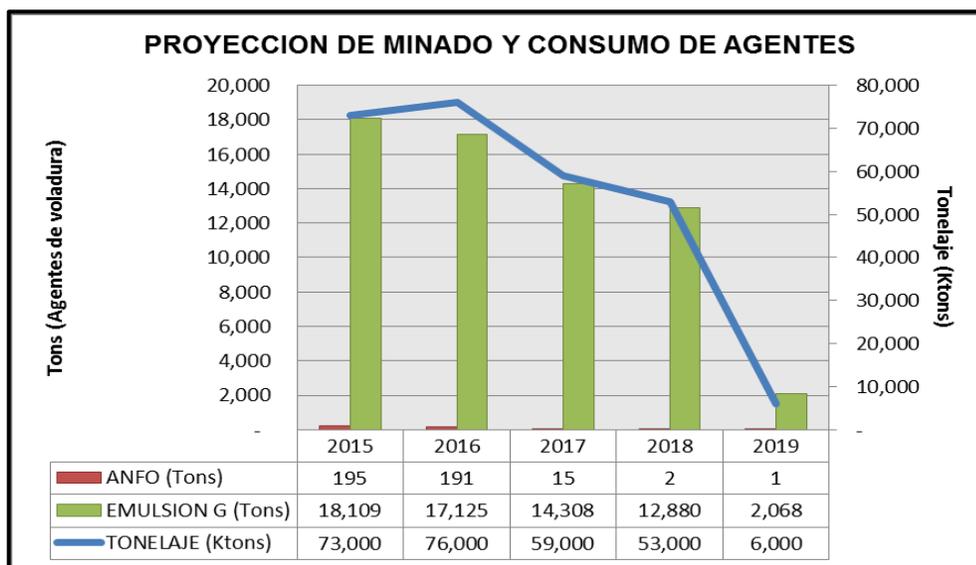


Figura 50. Proyección de consumo realizando los cambios de ANFOs pesados a emulsión G.

6.3. PROYECCIÓN DEL AHORRO ESTIMADO

Ahora podemos calcular el costo de los agentes de voladura para el caso presupuestado y para el caso propuesto en la presente tesis de cambiar los ANFOs pesados con emulsión TC a emulsión G (100%). La figura 51 muestra los ahorros estimados anuales.

Con estos cálculos, y el fundamento teórico mostrado en los capítulos IV y V, podemos demostrar que es técnica, ecológica y económicamente factible reemplazar los ANFOs pesados realizados a partir de emulsión TC con la emulsión G (100%) a diferentes densidades; generando en promedio un ahorro no descontado de \$ 3,43 millones desde el 2015 – LOM.

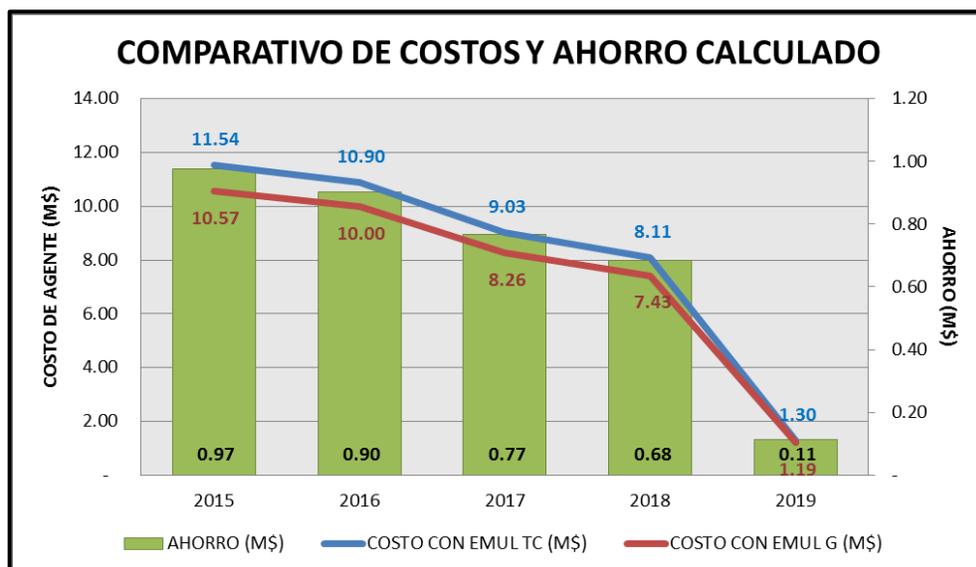


Figura 51. Ahorro proyectado reemplazando los ANFOs pesados con emulsión G.

6.4. RESULTADOS DE CONSUMOS DE AGENTES DE VOLADURA Y KPI DE CONTROL

Durante el 2015, y luego de realizar el cambio propuesto por la presente tesis, se formuló como KPI de control el costo por tonelada volada (\$ / TM), el cual es monitoreado constantemente por la gerencia de la empresa, además de compararlos con los consumos realizados para cada agente de voladura.

En las figura 52 y 53 se muestran los consumos de Nitrato de Amonio y Emulsión respectivamente realizados hasta la semana 36 del año 2015. Para ello se han utilizado gráficos de control tipo semáforo en donde la línea blanca representa el presupuesto BP2015.

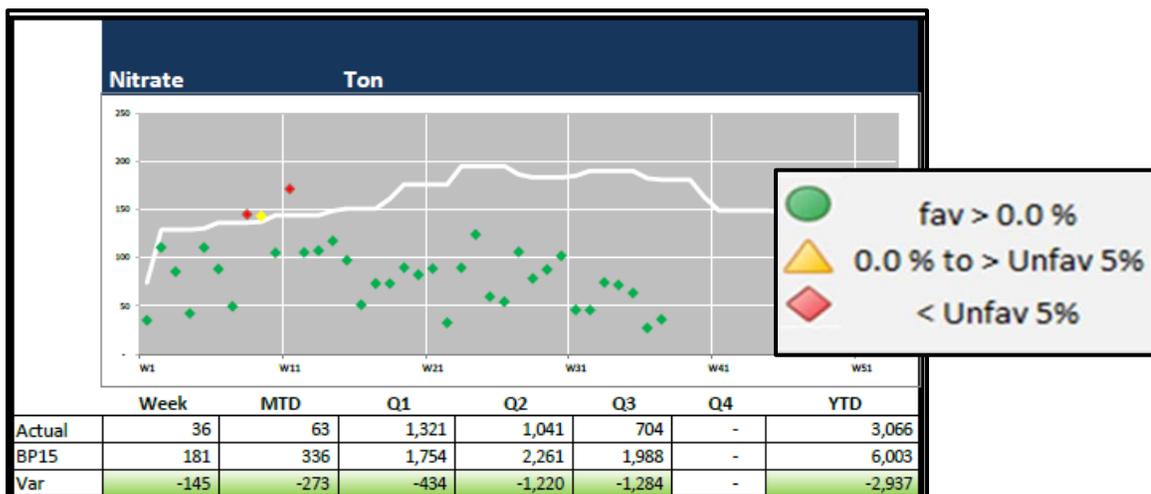


Figura 52.- Consumo semanal de nitrato de amonio.

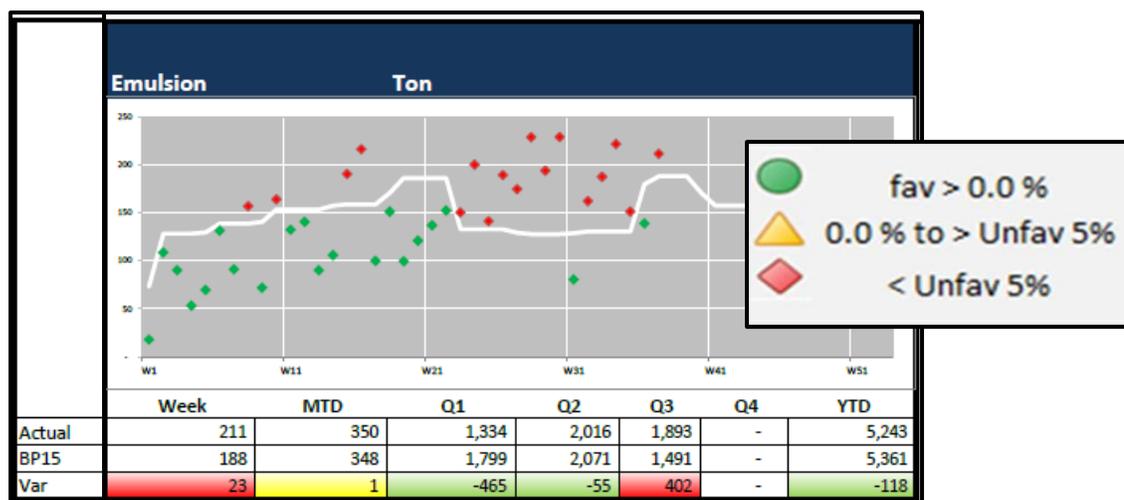


Figura 53. Consumo semanal de emulsión.

Como se puede ver en las figuras superiores, el consumo de nitrato es mucho menor al planeado y el de emulsión muy superior al planeado (especialmente a partir del segundo quarter del año), esto debido principalmente al reemplazo de mezclas explosivas de ANFO pesado formulados a partir de emulsión TC con la emulsión gasificada al 100%.

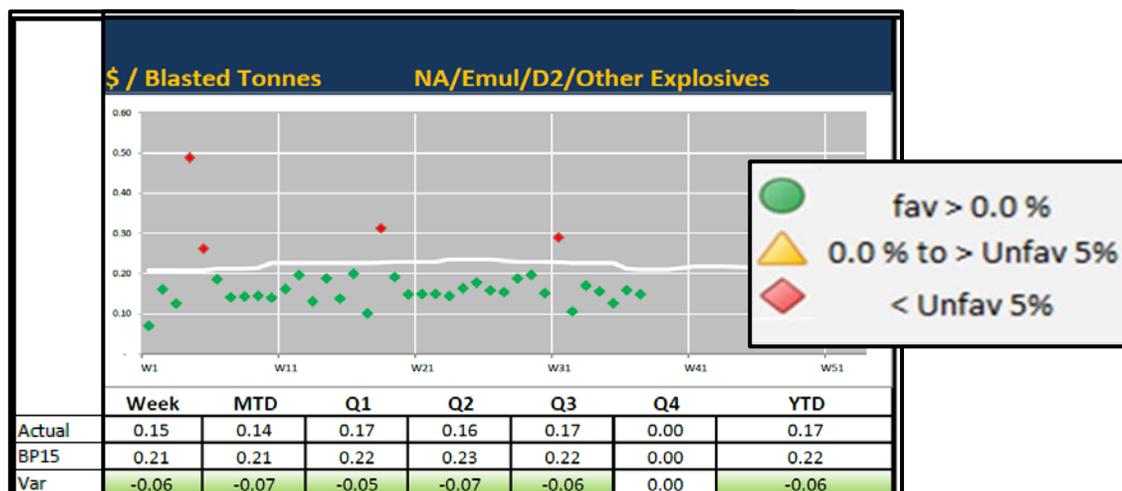


Figura 54. Costo por tonelada volada versus el presupuesto BP2015.

Como se puede observar en la figura 54 el costo por tonelada proyectado era de 0,22 \$/TM mientras que actualmente el mismo se mantiene en 0,17 \$/TM. Mostrando un claro ejemplo de la reducción de los costos operativos por cambio de agente de voladura.

En vista de que la fragmentación en los polígonos disparados con emulsión G y la tasa de excavación de los equipos de carguío para dichos polígonos no presenta variación significativa respecto a polígonos disparados con ANFOs pesados formulados a partir de emulsión TC, y que la malla de perforación no se modificó para este proyecto de tesis; se puede deducir que el costo unitario (\$/TM) de las otras actividades operativas no presentará variación.

6.5. VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO

Los camiones mezcladores de explosivos con los que cuenta MYSRL tienen la posibilidad de trabajar con la emulsión gasificada y de añadir nitrito de sodio a la mezcla, por lo que el proyecto no requiere una inversión considerable para ser llevado a cabo. Sin embargo, para efectos de evaluar la rentabilidad del proyecto se calcula el Valor Presente Neto (VPN) del mismo a una tasa de descuento de 12%, que es la tasa con la que se evalúan los proyectos operativos en MYSRL.

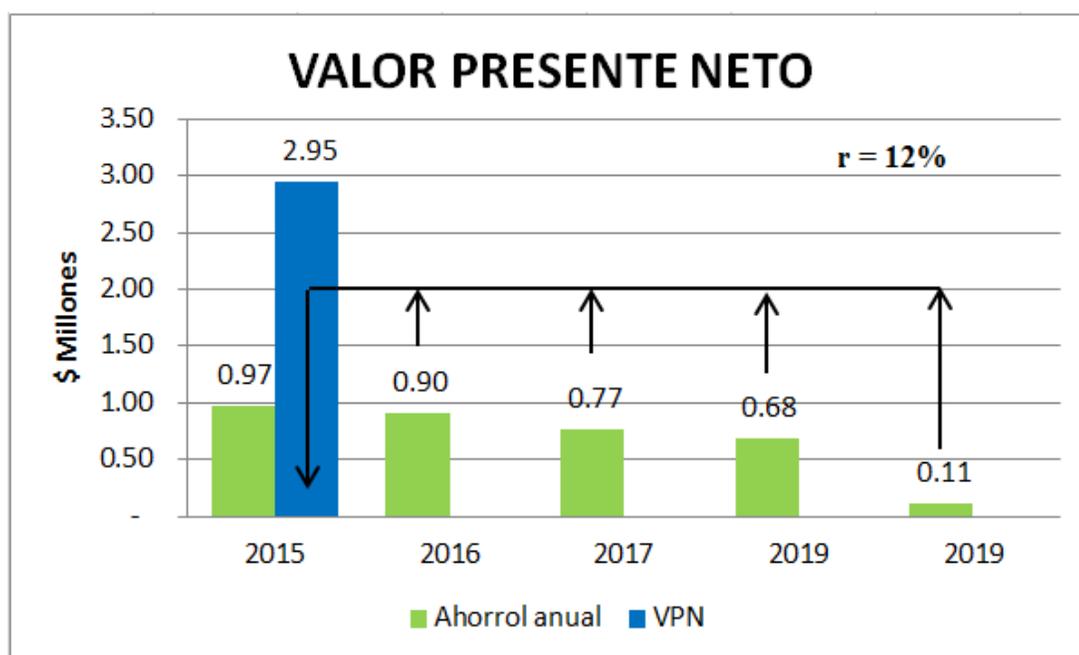


Figura 55. Ahorros anualizados en millones de dólares y tasa de descuento.

Con estos cálculos el VPN del proyecto es de \$ 2,95 millones de dólares a una tasa de descuento del 12%.

CONCLUSIONES

1. Las emulsiones gasificadas son más resistentes al agua bajo condiciones de lluvia y nivel freático elevado (condiciones que se presentan a menudo en MYSRL) que los ANFOs pesados formulados a partir de emulsión TC.
2. Las emulsiones gasificadas, por no tener contenido de nitrato de amonio grado prillex, garantizan siempre un balance de oxígeno negativo por lo que no generan gases nitros dañinos para la salud y el medio ambiente.
3. El sistema de carguío de emulsión gasificada dentro de los taladros es igual que el sistema de carguío de los ANFOs pesados con emulsión TC; en ambos casos la mezcla se puede vaciar a razón de 200 kg/min o bombear (para taladros con más de 2,0 m de agua) a razón de 80 kg/min.

4. La densidad de la emulsión gasificada medida en una taza tarada y una balanza calibrada, es menor que la densidad real dentro del taladro debido a la presión que es ejercida sobre el explosivo por la atmósfera, el taco y la columna explosiva superior.
5. Al ser la emulsión gasificada una mezcla compresible y un explosivo en estado líquido, ésta pierde su capacidad sensitiva para densidades dentro del taladro que se encuentran fuera del rango de 0.9 – 1,25 g/cm³.
6. Mediante varias pruebas de VOD para la emulsión G a diferentes densidades, se pudo concluir que ésta puede reemplazar a los ANFOs pesados formulados a partir de emulsión TC como se muestra en la tabla 19.

Tabla 19. Densidades para la emulsión G y su equivalente en ANFO pesado

MEZCLA EXPLOSIVA	D. DEL ANFO PESADO	REEMPLAZADA POR	D. FINAL DE TAZA DE EMULSIÓN G
ANFO	0.81 g/cm ³	Emulsión G (100%)	0.80 g/cm ³
HA 37	1.05 g/cm ³	Emulsión G (100%)	1.00 g/cm ³
HA 46	1.19 g/cm ³	Emulsión G (100%)	1.10 g/cm ³
HA 64	1.29 g/cm ³	Emulsión G (100%)	1.10 g/cm ³

7. La emulsión G a densidad de 0,8 g/cm³ tiene un costo superior al ANFO, por lo que no es posible reemplazar este explosivo por el primero. Para todas las demás mezclas explosivas si es económico reemplazarlas por la emulsión G. Esto se ha demostrado en las figuras 42-45 y se detallan en la tabla 19.

8. Se midieron las tasas de excavación (dig rate) de los equipos de carguío en los polígonos disparados con ANFO pesado y se compararon con los polígonos disparados con emulsión G a densidades equivalentes. No se encontraron variaciones en las tasas de excavación, garantizando que las voladuras con emulsión G generan los mismos resultados que las realizadas con ANFOs pesado formulados con emulsión TC.
9. Se realizaron mediciones de granulometría luego del disparo en zonas contiguas y de similar alteración litológica, las cuales fueron cargadas con HA46 y emulsión G a densidad $1,10 \text{ g/cm}^3$. No se encontraron diferencias significativas en el tamaño de los fragmentos producidos por los disparos con diferentes agentes.
10. Reemplazando los ANFOs pesados realizados con emulsión TC por la emulsión G a densidad variables entre el periodo 2015-2019, garantizaría un ahorro de costos sin descuento de \$ 3,43 millones y un VPN de \$ 2,95 millones a una tasa de descuento del 12%.

BIBLIOGRAFÍA

- ARANIBAR JAIME, Análisis avanzado de explosivos gasificadas, EXSA – 2014
- DELAGEY, MARK OWEN Y DE KLERK, Explosivos en emulsión con burbujas de gas, SASOL CHEMICAL INDUSTRIES LIMITED – 2001.
- EXSA, Fichas técnicas de agentes de voladura, EXSA – 2014.
- EXSA, Manual práctico de voladura – 2002.
- F. OUCHTERNOLY, S. NIE, U. NYBERG & J. DENG, Monitoring of large open cut rounds by VOD, PPV and gas pressure measurements, International Journal of blasting and fragmentation – 1997.
- GERENCIA TÉCNICA ENAEX, Manual de tronadura – 2004.
- LANGEFORS, Técnica moderna de voladura de rocas, URMO – 1976.
- LOPEZ JIMENO, CARLOS, Perforación y Voladura de rocas, ITGE – 1995.
- LOPEZ JIMENO, MANUEL, Evaluación de la energía de los explosivos mediante modelos termodinámicos de detonación, Universidad Politécnica de Madrid – 2003.
- MING LU, QIFA LIU, A novel mathematical model of formulation design of emulsion explosive, Journal of the Iranian Chemical Research – 2008

- NEWMONT MINING CORPORATION, Investor reserves and resources – 2009.
- PUMEZA MELANE, Kinetics reactions of ammonium nitrate-sodium nitrite reaction and ammonium nitrate emulsion explosive, University of Cape Town – 2010.
- SCHERPERNISSE, PhD MC KENZIE, Diseño y evaluación de voladura – 1997.
- SERVICIOS TÉCNICOS ORICA, Voladura segura y eficiente en minas a rajo abierto – 2008.

ANEXOS

ANEXO 01

En los siguientes gráficos se muestran algunos de los resultados de las pruebas de VOD realizadas en MYSRL para la emulsión G a diferentes densidades con el software MicroTrap ®

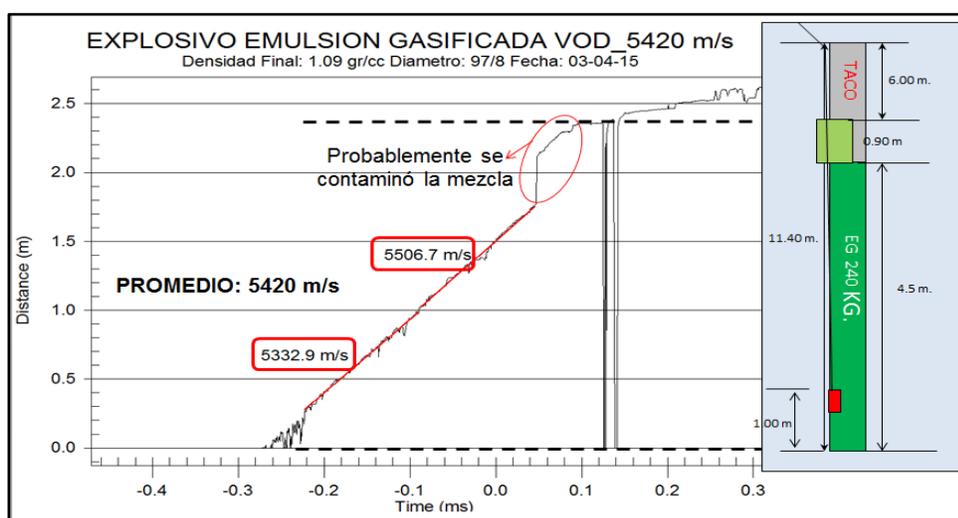


Figura 56.- Prueba de VOD realizada en el tajo Chaquicocha.

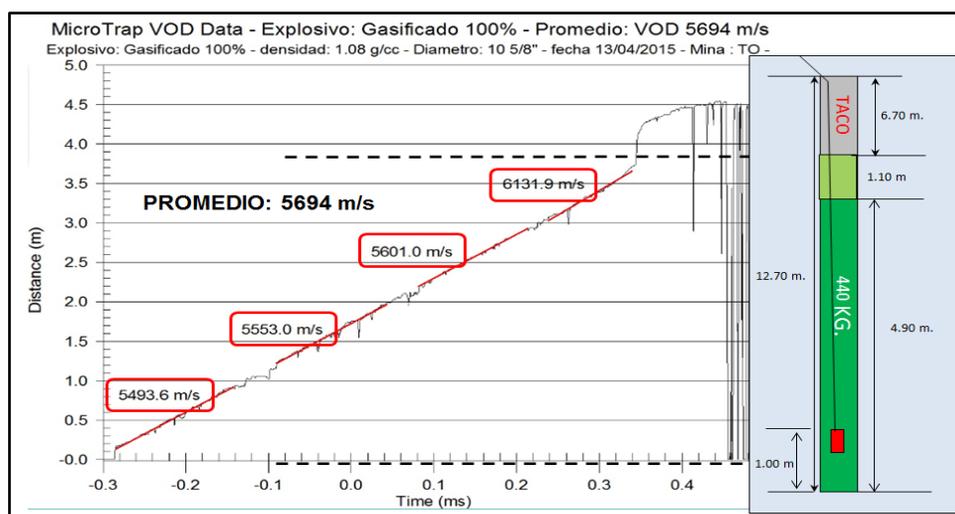


Figura 57.- Prueba de VOD realizada en el tajo Tapado Oeste.

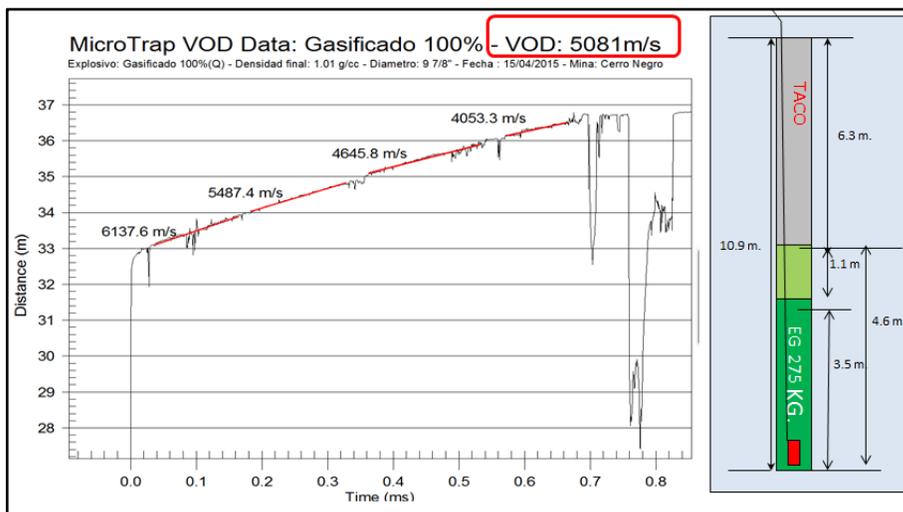


Figura 58.- Prueba de VOD realizado en el tajo Cerro Negro.

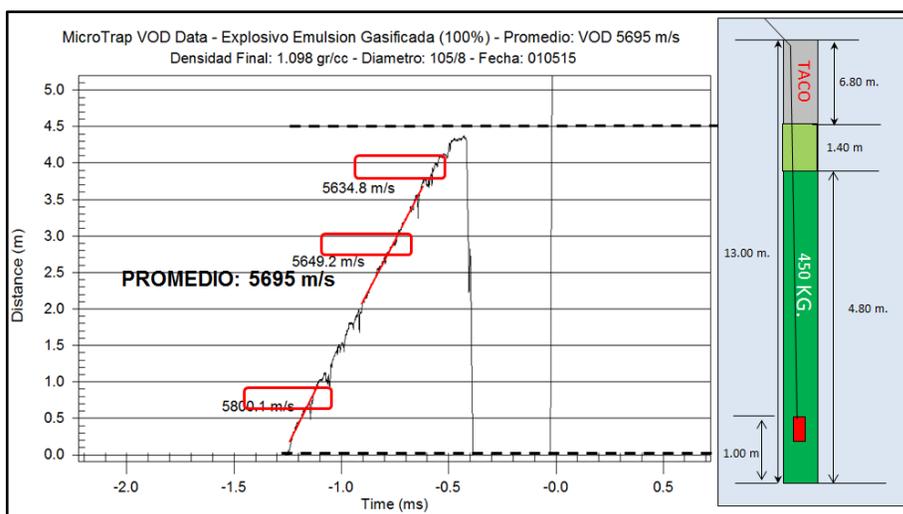


Figura 59.- Prueba de VOD realizada en el tajo Tapado Oeste.