



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Metodología *Lean Six Sigma* aplicada a  
un caso real de barrenación y voladura  
en la minería subterránea**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero de Minas y Metalurgista**

**P R E S E N T A**

José Arturo Cuevas Hernández

**DIRECTOR DE TESIS**

M. A. Gabriel Ramírez Figueroa



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**

*Para mis padres, Leticia y Teodoro.  
Las siguientes palabras sólo expresan una  
pequeña parte de la admiración, respeto y  
cariño que les tengo a mis primeros  
maestros.*

*Con todo mi cariño, este logro es por y  
para ustedes.*

*Para mis hermanos, Edgar y Carlos A.  
Mi formación académica y personal ha sido  
apoyada incondicionalmente por ustedes.  
Excelentes hermanos y seres humanos.*

*Ciudad Universitaria, 2021*

# Agradecimientos

Agradezco al Ing. Jorge Robles por compartir sus conocimientos y asesorarme durante mi estancia en el estado de Sonora.

A la Facultad de Ingeniería, por permitirme tener experiencias gratas de desarrollo personal, académico y profesional. Una segunda casa que siempre llevaré en mi corazón.

A todas las grandes amistades hechas a lo largo de mi vida académica que me han apoyado, alentado y enseñado a lo largo de esta etapa tan maravillosa llamada "estudiante".

Al Ing. Gabriel Ramírez Figueroa por su paciencia, tutela y apoyo a lo largo de la elaboración de este escrito. Gracias por todos sus consejos, anécdotas y palabras de aliento.

# Índice

Resumen .....	iv
Introducción .....	v
Objetivo .....	vii
1. Marco teórico .....	8
1.1. Lean Management y Six Sigma .....	9
1.1.1. Modelos DMAIC.....	13
1.1.2. Herramientas <i>LSS</i> para la resolución de problemas .....	16
1.2. Beneficios de la metodología <i>LSS</i> .....	25
2. Planteamiento del caso práctico.....	27
2.1 Definición de la problemática .....	28
2.1.1. Diagrama del proyecto.....	32
2.1.2. Diagrama del proceso .....	32
2.1.3. Diagrama PEPSU.....	33
3. Mediciones realizadas.....	36
3.1. Tiempos y movimientos .....	37
3.2. Consumo de acero.....	41
3.3. Avance de voladura .....	46
4. Análisis del proceso.....	51
4.1. Diagrama de Ishikawa .....	56
4.2. Diagrama de la cadena de valor .....	57
5. Propuesta de mejora .....	59
5.1. Análisis financiero.....	64
5.2. Simplificación de los procedimientos de trabajo.....	67
6. Control del proceso .....	69
6.1. Propuesta de formato para voladura .....	71
Conclusiones.....	73
Recomendaciones.....	75
Anexo 1 Diagrama del proyecto.....	76
Anexo 2 Diagrama del proceso de barrenación y voladura .....	78
Anexo 3 Diagrama de Ishikawa .....	81
Anexo 4 Procedimiento Barrenación con <i>Jumbo</i> .....	82
Anexo 5 Procedimiento Voladura con <i>Anfo loader</i> .....	85
Anexo 6 Tarjeta de barrenación y voladura .....	88
Anexo 7 Histórico de voladura .....	89
Referencias.....	91

# Resumen

Este escrito busca mostrar por medio de un ejemplo práctico la implementación de la metodología administrativa y estadística *Lean Six Sigma*.

La implementación de esta metodología se realiza por medio de un marco de referencia propuesto en un artículo y se complementa con la experiencia adquirida a lo largo de la estancia de tres meses en una mina subterránea en el estado de Sonora.

La posible solución planteada para la deficiencia en los avances de disparo en los topes de desarrollo en el rebaje 2 se sustenta por medio de un proyecto de mejora *Lean Six Sigma*, que tiene como objetivo principal una disminución del 10% en el costo de cuele de obra.

Para obtener el beneficio económico de la reducción del 10% se propuso aumentar el factor de carga, uniformizar el rendimiento de los operadores de jumbo y simplificar los procedimientos de los procesos.

Por último, es importante mencionar que el análisis financiero muestra que sólo se obtiene una reducción del 7% en el costo de cuele de obra y que el principal beneficio que se obtendría por medio de la mejora sería agilizar el proceso de extracción.

# Introducción

Hoy en día la complejidad en la explotación de los yacimientos minerales demanda mejores prácticas ingenieriles para su extracción de manera sustentable. Por este motivo, es conveniente incorporar herramientas administrativas y estadísticas para optimizar y agilizar los procesos de desarrollo de producción.

Para realizar una adecuada implementación de esta metodología, es necesario conocer el marco de referencia descrito en el capítulo uno. Posteriormente, del capítulo dos al capítulo seis, se describen las herramientas utilizadas a lo largo de este proyecto.

El estudio se llevó a cabo en una unidad minera en el estado de Sonora, donde se analizaron los problemas existentes en la eficiencia del disparo en los topes de desarrollo del Rebaje 1 y Rebaje 2. Entonces, se planteó un proyecto de mejora *Lean Six Sigma* para los procesos de barrenación y voladura, el cual tendría como meta disminuir aproximadamente un 10% el costo del cuele de la obra en dichos procesos y mejorar entre un 10% y 25% (0.40 *cm* a 1.0 *m*) la eficiencia de disparo en los topes de desarrollo.

Para lograr lo anterior se empleó el modelo *DMAIC* (*DEFINIR-MEDIR-ANALIZAR-MEJORAR-CONTROLAR*).

En el capítulo dos se plantea la problemática y se delimitan los alcances del proyecto a través de un esquema general. Además, se presenta un diagrama del proceso que permite identificar los elementos claves necesarios para realizar de manera eficiente un cuele de obra.

En el capítulo tres se describe el proceso de barrenación y se recopilan los datos necesarios para determinar el estado actual del proceso y evaluar la viabilidad de mejora.

El capítulo cuatro consiste en realizar un análisis detallado de los datos proporcionados y recopilados durante la etapa anterior.

El capítulo cinco plantea y fundamenta la propuesta de mejora para optimizar el proceso de barrenación y dar una solución a la causa raíz del problema delimitada en la etapa anterior. Además, en esta etapa se realiza un análisis financiero para cuantificar el beneficio económico.

Por último, en el capítulo seis, se ofrece una explicación de cómo mantener el nuevo estado del proceso por medio del control de mediciones a través de una "Tarjeta de barrenación y voladura" que a su vez se complementa con el formato denominado "Histórico de voladuras". En el primero se recopilan los datos básicos del proceso de barrenación y voladura para realizar un análisis detallado que facilite la búsqueda de soluciones en caso de que llegase a presentarse una nueva problemática; y el segundo permite evaluar los resultados y supervisar los procesos de barrenación y voladura.

# Objetivo

Realizar el planteamiento teórico para implementar la metodología administrativa y estadística *Lean Six Sigma* a un proceso de barrenación y voladura en minería subterránea.

## Objetivos específicos

1. Mostrar la utilidad de emplear un marco de referencia general para implementar *Lean Six Sigma* en un proceso minero.
2. Aplicar herramientas estadísticas y administrativas para proponer una mejora al proceso de barrenación.

# 1. Marco teórico

La explotación de recursos minerales en siglo XXI contribuye significativamente al Producto Interno Bruto (PIB) de los países en vías de desarrollo y México es un claro ejemplo de ello. En México, el 2.4%<sup>1</sup> del PIB nacional es generado por la actividad minera que se practica a lo largo del país y el impacto de la minería es tan grande que se generan aproximadamente 379,020 empleos directos<sup>2</sup>.

En años recientes, las empresas mineras son unidades financieras de alto riesgo que generan aproximadamente el 35%<sup>3</sup> de utilidades para sus inversionistas. Por otra parte, años atrás estas empresas se consideraban proveedoras de *commodities* que movilizaban las economías nacionales de los países con depósitos minerales.

Actualmente existen dos problemáticas en la minería, la primera es el comercio internacional y las energías renovables que cada día demandan mayor consumo de minerales para mantener el estilo de vida de una creciente civilización y el agotamiento de los yacimientos someros.

Una solución puede ser la minería subterránea, pero debe ser eficiente. Es decir, debe extraer y procesar un mayor tonelaje en un lapso menor de tiempo a través de procesos ágiles y con costos de producción bajos.

Para lograr dicho fin se puede implementar la metodología *Lean Six Sigma*, la cual es un método administrativo que tiene como objetivo aumentar la productividad de los procesos y controlarlos estadísticamente.

La metodología *Lean Six Sigma* es una combinación de la metodología japonesa *Lean Management* y la metodología norteamericana *Six Sigma*. La primera fue desarrollada en los años 50<sup>4</sup> por Kiichiro Toyoda, fundador de la marca de vehículos Toyota y se enfoca tanto en la reducción de costos como en agilizar los procesos. La segunda fue aplicada por la empresa Motorola en 1970<sup>5</sup> para mejorar la calidad de los productos a través del enfoque de eliminar la variación a lo largo del proceso.

---

<sup>1</sup> CAMIMEX (2019), *Informe Anual*.

<sup>2</sup> SGM (2018), *Anuario Estadístico de la Minería Mexicana*.

<sup>3</sup> Servin (2018) *Apuntes Economía Minera*, Facultad de Ingeniería, UNAM.

<sup>4</sup> Ohno (1980), *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*.

<sup>5</sup> Kęsek, Bogacz y Migza (2019), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Sci. 214 012090*.

## 1.1. *Lean Management y Six Sigma*

Es necesario describir brevemente el origen, componentes, beneficios y limitantes de la metodología *Lean Six Sigma* para comprender la razón por la que se considera adecuada su implementación en la minería. Pero para entender esta metodología es necesario describir de manera rápida las metodologías que le dieron origen, es decir, *Lean Management* y *Six Sigma*.

Para fines prácticos, desde este punto para referirse a *Lean Six Sigma*, *Lean Management* y *Six Sigma* se utilizarán las siglas *LSS*, *LM* y *SS* respectivamente.

*LM* es una metodología administrativa que busca agilizar los procesos y agregar valor al producto en cada etapa del proceso a través de la identificación y eliminación de los desperdicios<sup>6</sup>. En cambio, *SS* es una metodología que utiliza herramientas estadísticas para mejorar la capacidad de los procesos. Además, conceptualiza al proceso como una unidad de mejora que busca eliminar o reducir la variación dentro del proceso.

La metodología *LM* es multidisciplinaria por enfocarse al proceso y conceptualizar al producto como una unidad de producción. Esto ha permitido aplicar sus principios a diferentes tipos de procesos; teniendo éxito en todas ellas cuando se implementa de la forma correcta. Por lo tanto, a los principios básicos de la esencia de la metodología se les conoce como *Lean Operation*<sup>7</sup>.

El objetivo principal de *Lean Operation* es muy simple y consiste en eliminar todos los desperdicios y maximizar la eficiencia del proceso. Los elementos clave incluyen los siguientes:

- Identificar y eliminar los desperdicios
- Genera un sistema de producción *Pull-based* (fundamentado en "jalar el producto" – es decir, producir con base en la demanda - y no empujar o "saturar el inventario")

---

<sup>6</sup> Moden, 1993, Ohno, 1990, Shingo, 1989.

<sup>7</sup> Yang & Basem (2009), *Desing for Sx Sigma. A Roadmap for product Development*.

- Crear ciclos de trabajo completos<sup>8</sup> (flujos completos o *One Flow*)
- Identificar la cadena de valor
- Reducir los tiempos de ajuste
- Generar celdas de trabajo

Por otra parte, el propósito de *SS* consiste en incrementar el rendimiento del proceso a partir de disminuir la variabilidad (disminución de los productos defectuosos<sup>9</sup> por la línea de producción), mejorar la rentabilidad del negocio, capacitar continuamente al personal, aumentar la calidad del producto en cada etapa del proceso y generar un sistema de negocio de excelencia.

Por lo mencionado en el párrafo precedente, existen dos variantes de mejoras al emplear *Six Sigma*:

- **Las mejoras de procesos:**

Son las más conocidas y empleadas en varias industrias, estas no involucran cambios profundos en la estructura fundamental de los procesos. Ello implica encontrar la solución de las causas raíz del problema mientras se deja intacta la esencia del proceso

- **El re-diseño de procesos:**

Se le conoce como método *DFSS*, por su nombre en inglés *Design for Six Sigma*. Es un enfoque que involucra el cambio o rediseño de la estructura fundamental del proceso base y la meta de este es diseñar o reestructurar el proceso para que logre la máxima satisfacción del cliente y un funcionamiento constante del proceso

Después de explicar las metodologías *LM* y *SS*, se puede definir a *LSS* como la combinación de ambas metodologías y fue creada a los finales de los noventa después de que se observó que los enfoques de ambas metodologías se complementaban y potencializan los beneficios. Porque *Manufactura esbelta*<sup>10</sup> se enfoca en la variación del flujo del proceso mientras *Six Sigma* en la variación del proceso; al utilizarlas en conjunto da como resultado la agilización procesos y la precisión de estos.

La metodología *LSS* ha sido ampliamente aplicada en la industria automotriz, pero en años recientes se ha tratado de implementar a otras

---

<sup>8</sup> Un ejemplo en la explotación minera es cuando se tumba el mineral de un tope, y se rezaga y acarrea de forma inmediata para iniciar un nuevo ciclo de barrenación. En pocas palabras, mineral tumbado, mineral acarreado.

<sup>9</sup> Unidades que tienen uno o más defectos.

<sup>10</sup> *Lean Management* también se le conoce como *Manufactura esbelta*.

industrias como la minería por las grandes similitudes que tienen ambas industrias. A continuación, se muestran algunos ejemplos de aplicación para esta industria:

Tabla 1 Herramientas LSS aplicadas a la minería  
Fuente: Elaboración propia

Herramienta LSS	Aplicación
Diagrama del proceso <sup>11</sup>	Hartman <sup>12</sup> lo utiliza didácticamente para definir las cuatro operaciones unitarias
Celdas de trabajo	Cada rebaje en una mina puede considerarse como una celda de trabajo, ya que dispone de sus propios recursos humanos, maquinarias y materiales para extraer el mineral o tepetate
Reducción de los tiempos de ajuste	La ubicación de talleres mecánicos en el interior de la mina, o mejor aún, el acercamiento del mecánico a los equipos ha reducido los tiempos de ajuste
Hojas de verificación ( <i>Check-List</i> )	La herramienta utilizada para verificar que las máquinas se encuentran en las condiciones adecuadas para poder operar
Control visual (5's)	En una herramienta para optimizar el entorno de trabajo, facilitar las actividades de los empleados y potenciar su capacidad para la detección de fallas.

La metodología *LSS* puede ser implementada en la minería porque esta guarda ciertas similitudes con la industria automotriz. Ambas son unidades de negocios individuales e independientes que buscan mejorar los métodos con el propósito de reducir los costos de operación, aumentar la productividad y eficiencia<sup>13</sup>, optimizar procesos, mejorar la comunicación interna<sup>14</sup>, establecer metas y planes<sup>15</sup> y satisfacer al cliente. Pero se dificulta su implementación por no tener un marco de referencia general.

Para dar una solución a la problemática anterior, se extrajo el marco de referencia propuesto en el artículo "*A Lean Implementation Framework*"

<sup>11</sup> En inglés se conoce como *process mapping*, equivocadamente traducido como "mapeo del proceso".

<sup>12</sup> Hartman (2002), *Introductory to Mining Engineering*.

<sup>13</sup> Chlebus *et al.* 2015

<sup>14</sup> Castillo *et al.* 2015

<sup>15</sup> Dunstan *et al.* 2016

for the Mining Industry” de los autores Seifullina, Er, Nadeem, Garza Reyes y Kurmar.

Este marco fue resultado de una búsqueda exhaustiva en artículos escolares y reportes oficiales. De los 9,877 documentos relacionados con la implementación *Lean*, sólo ocho cumplieron con la calidad de estudio, relevancia con los objetivos y enfoque de investigación. De estos últimos, se identificaron varios marcos teóricos para la utilización práctica y se propuso el que se muestra en la figura 1.

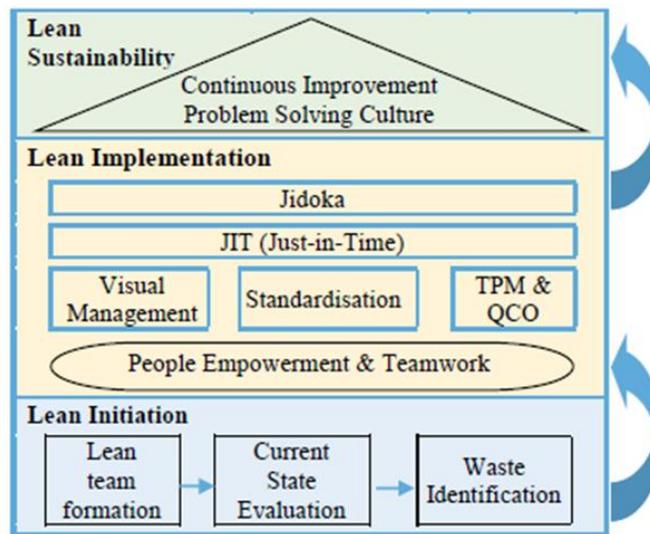


Fig. 1 Modelo de implementación LSS

Fuente: Seifullina, Er, Nadeem, Garza Reyes y Kurmar<sup>16</sup>

Del marco de referencia, se sabe que para iniciar la implementación LSS se debe:

1. Formar el equipo *Lean*
2. Evaluar el estado actual del proceso
3. Identificar las fallas del proceso

El primer punto no se aborda en este escrito porque en el mercado existen diversos manuales que pueden ser consultados para este fin.

Para realizar el punto dos y tres se recurre al modelo *DMAIC*. Este permitirá realizar una implementación sistemática y sencilla.

<sup>16</sup> La figura 1 se presenta en el idioma original de la fuente de consulta para hacer notar la terminología que se utiliza a nivel internacional.

### 1.1.1. Modelos *DMAIC*

El modelo *DMAIC* consiste en la siguiente secuencia de pasos:

- Definir el problema
- Medir los defectos y procesos de operación
- Analizar los datos y encontrar la causa del problema
- Mejorar<sup>17</sup> el proceso para eliminar las causas del defecto
- Controlar el proceso para asegurar que los defectos no regresen



Fig. 2 Modelo DMAIC

Fuente: <https://blogdelacalidad.com/que-es-dmaic>

Para facilitar la comprensión del desarrollo de este escrito, a continuación, se describe brevemente cada etapa.

#### **Etapa D (Definir)**

Es la primera etapa del modelo *DMAIC* y es la más importante porque se define la meta del proyecto, las limitantes y beneficios que se obtendrán a través de este. Además, se establece la estrategia de negocio a seguir.

Regularmente esta etapa incluye los siguientes pasos:

---

<sup>17</sup> Del inglés *improve*.

## Paso 1

Plantear el proyecto mediante el *Project Charter* o *Diagrama del proyecto*. Dicha herramienta simplifica la información del proyecto a implementar.

Esta herramienta establece el alcance y limitantes del proyecto; así como los involucrados y las responsabilidades de cada persona y/o áreas.

Generalmente incluye lo siguiente:

1. Asunto de la empresa
2. Metas y objetivos del proyecto
3. Etapas y metas intermedias<sup>18</sup>
4. Alcance, limitación y suposiciones del proyecto
5. Miembros del equipo
6. Roles y responsabilidades
7. Plan del proyecto preliminar

## Paso 2

Al tener establecido el objetivo del proyecto, se identifica y documenta el proceso.

El propósito de identificar el proceso a mejorar es establecer el proceso principal que genera el producto o servicio.

- a) *Identificar el proceso*. Generalmente un equipo de trabajo analiza un proceso a la vez. Los procesos identificados se dividen en:
  - Proceso principal
  - Procesos de apoyo
- b) *Documentar el proceso*. Después de identificar el proceso principal, es recomendable establecer el proceso ideal que permita modelar y analizar el actual; como un modelo *PEPSU* (Proveedor-Entradas-Salidas-Usuarios)

## Paso 3

- a) Identificar los requerimientos del cliente
- b) Analizar y priorizar los requerimientos del cliente

---

<sup>18</sup> En la literatura inglesa se hace referencia como *milestones* mientras que en algunas traducciones del inglés al español se manejan como *hitos*.

## Etapa M (Medir)

Medir es la etapa más importante porque implica recolectar los datos claves para evaluar el rendimiento actual del proceso y proveer la información necesaria para las etapas subsecuentes.

Esta etapa incluye los siguientes pasos:

1. Seleccionar lo que se va a medir
2. Desarrollar un plan de recolección de datos
3. Calcular el nivel estadístico *sigma* del proceso (si se cuenta con los datos suficientes)

## Etapa A (Analizar)

En este punto, se pueden identificar, verificar y cuantificar las causas raíz del problema con base en los datos recolectados y los procesos (principal y de apoyo) que han sido analizados. También, se establecen los objetivos de mejora.

Hay dos grandes retos en esta etapa:

En el *análisis de los datos* se estudia la distribución, tendencia y otras mediciones obtenidas por la recolección de datos. Dicho análisis puede sugerir, apoyar o rechazar las teorías acerca de las causantes del problema. Los métodos frecuentemente empleados incluyen:

- Diagrama de Ishikawa
- Diagrama de Pareto

El *análisis de los procesos* implica una observación detallada de los procesos clave de la empresa para identificar los ciclos de trabajo y retrabajo, las demoras y otros pasos que perjudican al producto para la satisfacción del cliente. Para dicha tarea se puede emplear:

- Diagrama general de la cadena de suministro del proceso
- Diagrama detallado de la cadena de valor

## Etapa I (Mejorar<sup>19</sup>)

Si en la etapa anterior se identifican las causas que generan los problemas de rendimiento; en esta etapa se plantea una solución para dar varias

---

<sup>19</sup> Del inglés *Improve*.

alternativas de solución al problema sin generar efectos perjudiciales al resto del sistema. Es decir, validar y dirigir las soluciones planteadas para poder implementar el plan de mejora.

Generalmente las soluciones propuestas se enfocan a la aplicación de técnicas como:

- Simplificación de procesos
- Procesos paralelos
- Eliminación de los procesos “cuello de botella”

### **Etapa C (Controlar)**

El propósito de esta etapa consiste en mantener las mejoras alcanzadas por la etapa anterior y estandarizar los procesos. Por tal motivo se documentan los cambios y se considera lo siguiente:

- Si las mejoras fueran realizadas con la aplicación de técnicas como la simplificación de procesos, es necesario establecer los nuevos estándares del proceso
- Una vez que el bajo rendimiento ha sido eliminado atacando la causa raíz, resulta de vital importancia mantener controladas las variables críticas del proceso por medio de un cuadro de control

## **1.1.2. Herramientas *LSS* para la resolución de problemas**

Existe una gran variedad de herramientas administrativas y estadísticas utilizadas para la implementación de un proyecto *LSS* pero con frecuencia sólo se llegan a utilizar las herramientas denominadas “*Las 7 herramientas de la calidad*”<sup>20</sup>

Estas herramientas analíticas son las más utilizadas por su facilidad en la aplicación y visualización. La intención de estas herramientas consiste en realizar un *análisis estático* para facilitar la comprensión de este para las personas que no son expertas en la metodología y proporcionar ayudas visuales para realizar un control más comprensivo.

A continuación, se describen las herramientas a utilizar:

---

<sup>20</sup> Terra Vanzant Stern (2016). *Lean Six Sigma International Standards and Global Guidelines*.

## ✓ Diagrama de flujo

Es una herramienta única e individualizada que se adapta a cualquier necesidad o propósito para mejorar la calidad del producto o proceso bajo estudio.

Es una representación gráfica que muestra diferentes tipos de flujos como procesos, datos o del producto mismo, lo cual presenta las siguientes ventajas:

- Facilita la comunicación entre los usuarios
- Permite el análisis de los procesos
- Identifica las necesidades de documentación
- Contribuye a la depuración de los procesos no productivos

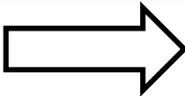
El diagrama de flujo se puede emplear en las tres primeras etapas del modelo *DMAIC*:

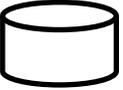
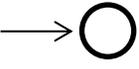
- En *Definir*, se utiliza para delinear el proceso
- En *Medir*, se emplea para estudiar y cuantificar las variaciones del proceso
- En *Analizar*, permite razonar los pasos de un proceso de forma ordenada

A continuación, se muestra una tabla con los símbolos más comunes.

Tabla 2 Simbología para diagramas de proceso

Fuente: Kai Yang; Basem y S. El-Haik. *Design for Six Sigma: A Roadmap for Product Development*

Símbolo	Nombre	Actividad representada
	Límites del proceso (Inicio/Fin)	Cuando el proceso inicia y termina; las palabras "Inicio" o "Fin" pueden ser escritas dentro del símbolo
	Actividad	Actividad en el proceso que transforma una entrada en una salida. Generalmente, la actividad es escrita en el interior
	Movimiento o transporte	Movimientos entre las estaciones o áreas
	Inspección	El flujo se detiene para evaluar la calidad de la salida y obtener una aprobación para continuar

	Retraso	Cuando algo debe esperar o ser temporalmente almacenado
	Almacenaje	Cuando una salida es almacenada por alguna razón en particular
	Decisión	Etapa del proceso que determina la siguiente acción a seguir
	Documentar	Registro de una actividad o un dato en una bitácora
	Base de datos	Almacenamiento electrónico de datos del proceso
	Conector	Símbolo que sirve para conectar la salida y entrada entre dos actividades que se encuentran en diferentes diagramas de flujo
	Flecha	Identifica la secuencia y dirección del flujo del proceso y generalmente transfiere la salida de una actividad a la siguiente

### ✓ Hoja de verificación

Es una lista de actividades que deben cumplirse al inicio o al final de estas y puede utilizarse para recabar datos clave del proceso. Es una de las herramientas de *Lean Six Sigma* más utilizada, potente y permite que los datos se recopilen de manera fácil, sistemática y ordenada (Ver figura 3).

Por otra parte, una hoja de verificación realizada al final de una actividad o ciclo de actividades puede mostrar el rendimiento y/o la capacidad de un proceso. Con ello, se puede cuantificar el grado de mejora por implementar.

En la industria minera, esta herramienta se utiliza antes y después de un proceso para el registro de datos importantes. Lo anterior, ayuda a la recolección de variables importantes y supervisar el proceso.

Las hojas de verificación o *check-list* son fáciles de entender, sin embargo, los datos recopilados deben ser variables que reflejen el desempeño del proceso que se supervisa. Por lo tanto, estos deben ser precisos y relevantes para mantener controlado el proceso.

POLYKARPO		CHECK LIST POLYKARPO S.A.		Folio: 032951	
1. CONDUCTOR:		Km :		FECHA :	
2. PATENTE TRACTO:		N° INTERNO TRACTO:			
3. DOCUMENTACIÓN TRACTO			4.- ARTICULOS EN TRACTO		
Permiso de Circulación	Fecha Vencimiento	Alarma Retroceso	SI / No		
Revisión Técnica		Botiquín Primeros Auxilios			
Seguro Obligatorio		Celular Operativo			
Extintor Código (certificación)		Copia de Resolución SNS			
Extintor Fecha de Vencimiento		Cuñas en buen estado			
Fecha Certificado de Inscripción		Elementos de Seguridad (EPP)			
		Kit de Emergencia Tracto			
		Kit Eléctrico Tracto			
		Kit Herramientas Tracto Completo			
		Lava Ojo con Agua			
		Letrero Expedidor			
		Letrero NU+Rombo			
		Licencia de Conducir Vigente			
		Manual de Transporte Seguro			
5.- EQUIPO			6. NEUMATICOS:		
Nivel de Agua, dentro rango	SI / No	Vigías en buen estado	SI / No		
Nivel de Aceite, dentro rango		Perdida de Aire			
Luces Operativas		Gata / Barrote			
Frenos Operativos		Traba Tuercas-Check point operativo			
Embrague					
Fugas y Filtraciones	SI / No	Buena: B			
Agua/Aceite/Combustible		Regular: R			
Tacógrafo Operativo		Mala: M			
TAG, Instalado y Operativo					
7.- OBSERVACIÓN DEL TRACTO:					
Firma: _____					

Fig. 3 Ejemplo de un check-list de tracto camión  
Fuente: Asociación Gremial de Industriales Químicos de Chile

✓ **Diagrama de Causa - Efecto**

Este diagrama forma parte de la familia de herramientas de tipo iterativo conocidas como "Herramientas de análisis de causa raíz" (*RCA* por sus siglas en inglés *Root Cause Analysis*) y están orientadas a la solución de problemas que ya ocurrieron (correctiva); sin embargo, su aplicación ideal se presenta en la anticipación de los problemas (preventiva).

También conocida como diagrama de espina de pescado o Ishikawa fue creado por Kaoru Ishikawa, quién fue uno de los pioneros en la utilización de las herramientas analíticas de resolución de problemas<sup>21</sup>.

Esta herramienta se utiliza para identificar, explorar y mostrar gráficamente todas las posibles causas relacionadas con un problema en particular, denominado "efecto". Las principales categorías de causas que contribuyen al efecto se asignan a las ramas principales del diagrama.

En ellas se define el problema, se identifican las causas posibles y probables, se organizan para resaltar las principales y ayudan a la generación de ideas para la solución del problema. Además, su formato es útil cuando los resultados deben ser presentados a otros.

<sup>21</sup> Terra Vanzant Stern (2016). *Lean Six Sigma International Standards and Global Guidelines*.

Para dar un enfoque estructurado a la solución del problema, las ramas principales del diagrama se clasifican en 4 o 6 categorías conocidas como *Four M's* o *Six M's* que a continuación se muestran:

- Materiales
- Maquinaria
- Mediciones
- Método
- Mediciones
- Medio ambiente

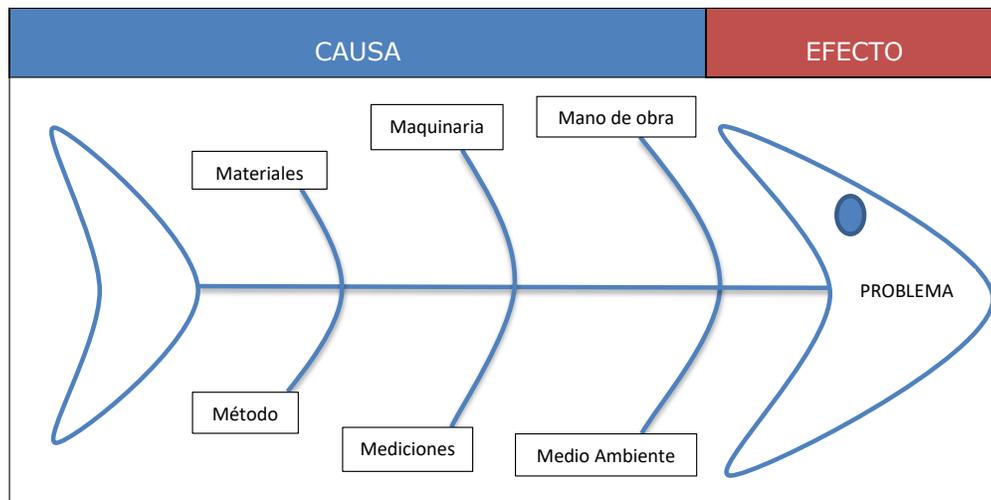


Fig. 4 Diagrama de Ishikawa  
Fuente: Elaboración propia

## ✓ Histograma

Es una herramienta especializada de gráfico de barras utilizado para representar y resumir grupos de datos. Además, permite mostrar la distribución de un conjunto de datos del proceso para identificar rápidamente las medidas de tendencia central (promedio, moda y mediana) y las medidas de dispersión (rango y desviación estándar).

Dicha herramienta es muy útil en la metodología *LSS* porque puede dar información sobre la distribución de frecuencia para una determinada población de datos y muestra las especificaciones deseadas (por ejemplo, los límites de control de los avances de disparo). Además, la extensión de la distribución es un buen indicador de la capacidad del proceso.

La desventaja que tiene un histograma es que no muestra el orden con el que se produjeron los datos. Lo que dificulta determinar las condiciones de trabajo en las cuales se generaron los datos.

A continuación, se muestra un histograma empleado en la minería para documentar la precipitación media mensual en Andalgalá, Argentina. Dicho histograma es empleado para el diseño de canales de desagüe de un tajo abierto.

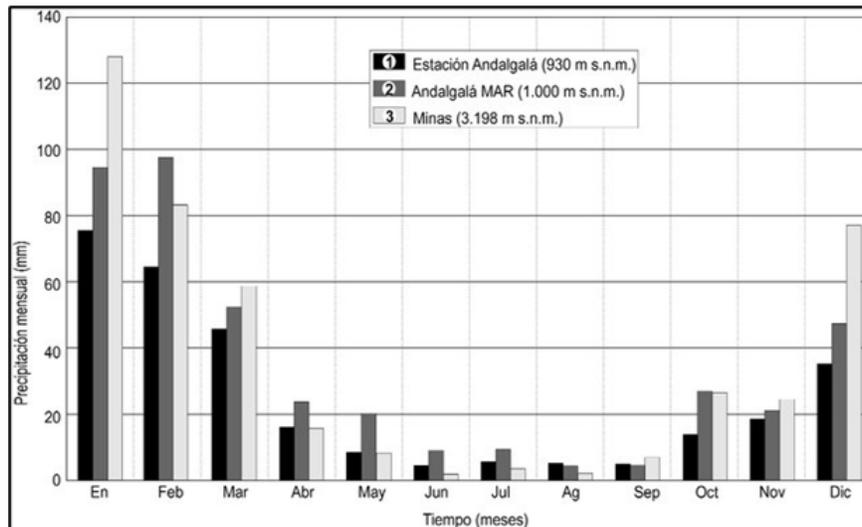


Fig. 5 Histograma de precipitación media mensual en el Valle Andalgalá

Fuente: Stella M. Moreiras

### ✓ Diagrama de Pareto

Esta herramienta fue desarrollada por el economista italiano Vilfredo Pareto describiendo la distribución de frecuencias. También se conoce como la regla 80-20.

El propósito de esta herramienta es priorizar los problemas para decidir cual se aborda y soluciona. Ya que ninguna empresa tiene los suficientes recursos para abordar cada uno de ellos.

A continuación, se muestran los pasos a seguir para elaborar un diagrama de Pareto:

1. Preparar los datos
2. Ordenar los elementos
3. Calcular el porcentaje acumulado de cada elemento
4. Seleccionar los elementos *pocos vitales* y los *muchos triviales*
5. Rotular el diagrama de Pareto

Típicamente en el eje vertical izquierdo se coloca la frecuencia de ocurrencia y en el eje vertical derecho el porcentaje acumulativo del número total de ocurrencias, el costo total o el total de la unidad de medida particular.

A continuación, se presenta un ejemplo aplicado a la minería. Es un diagrama de Pareto de las causas raíz de paralización en el pique<sup>22</sup> 447; extraído de una presentación del 2017 de "I Innovación Tecnológica minera" organizada por la Universidad Nacional de Ancash, Perú; realizada por el Ing. Wilfredo Chávez T.



Fig. 6 Diagrama de Pareto de las causas raíz de paralización del pique 447

Fuente: Wilfredo Chávez T.

### ✓ Diagrama de dispersión

Sirve para comparar dos variables y detectar si existe una relación, la cual puede ser positiva, negativa o sin correlación. A continuación, se describen brevemente:

- *Fuerte correlación positiva*: los datos se agrupan estrechamente a lo largo de una línea de tendencia con una pendiente ascendente (cuando una variable aumenta, la otra también).

<sup>22</sup> Un pique, es un término de peruano, se refiere a las obras subterráneas verticales donde se extrae el mineral. En México, se les conocen como rebajes.

- *Fuerte correlación negativa*: los datos están agrupado a lo largo de una línea de tendencia con una pendiente descendente (cuando una variable disminuye, la otra también).
- *Sin correlación*: los datos parecen una ráfaga de escopeta.

El diagrama de dispersión es una herramienta de diagnóstico útil para determinar la asociación; pero si dicha asociación existe la gráfica puede o no sugerir una causa y efecto subyacente. Además, lo normal es que la variable independiente sea la controlable y se coloque en el eje horizontal.

Por último, para analizar los resultados obtenidos por los diagramas de dispersión es necesario tener claro los conceptos de precisión y exactitud para evitar malas interpretaciones de las gráficas.

La precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos por medio de mediciones de una magnitud. Una medida de la variabilidad es la desviación estándar y la precisión se puede estimar como función de ella, por lo tanto, cuanto menor es la dispersión mayor es la precisión.

Por otra parte, la exactitud se refiere a que tan cerca se encuentra la medición tomada al valor de referencia. En términos estadísticos, la exactitud se relaciona con el sesgo de la distribución normal, es decir, esta se expresa mediante el error absoluto de la diferencia del valor experimental y valor verdadero.

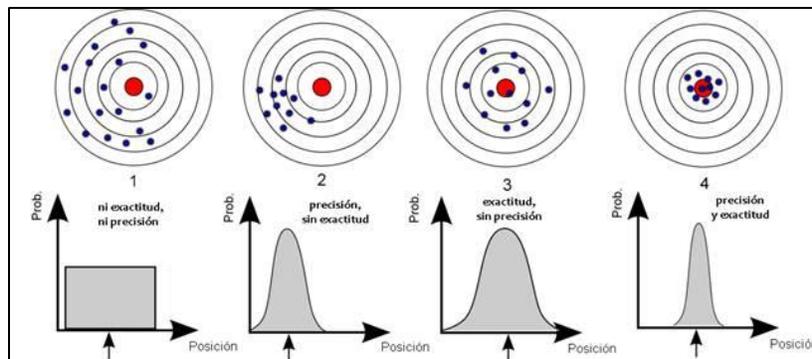


Fig. 7 Diferencia entre precisión y exactitud

Fuente: Ruíz Juárez Roberto (2019) del curso Métodos numéricos

Para ejemplificar el uso de esta herramienta en la minería, se muestra a continuación una correlación de ley en %Cu/ton entre mina y planta en

437 días de una mina de Yamada Gold Inc. que permite mantener un control de la ley de cabeza promedio.

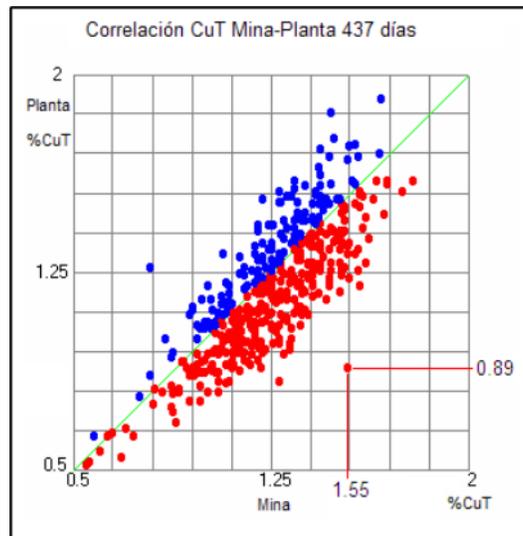


Fig. 8 Diagrama de dispersión de la ley mineral en mina-planta  
Fuente: Marco A. Alfaro, Yamada Gold Inc.

### ✓ Cuadro de control

Se utilizan para garantizar que el proceso esté bajo los estándares establecidos y monitorear la variación de forma continua. Edwards Deming popularizó el uso de estos cuadros y ahora se usan globalmente para determinar si un proceso está bajo control y predecir los resultados futuros.

Los cuadros de control son gráficos que muestran una imagen del proceso bajo estudio durante un período de tiempo. Pero es necesario comprender la variación y la casi variación. A continuación, se da un ejemplo.

En la industria minera, la variación y la casi variación se puede explicar por medio de la ley mineral y la ley de corte. La primera es la concentración heterogénea anómala natural del mineral dentro de un yacimiento mineral, mientras la segunda es la concentración mineral que diferencia la ganga de la mena y se controla.

El cuadro de control es una herramienta ampliamente empleada en la minería para supervisar los diferentes procesos; por ejemplo, la cantidad de reactivos en una celda de flotación y el factor de carga dentro de los rebajes.

En una unidad minera del norte del país, los cuadros de control se emplean para monitorear el factor de carga empleado en los bancos de producción y los topes de desarrollo. En la figura 9, se muestra el cuadro de control del factor de carga del mes de enero del 2019 de los topes de desarrollo de la unidad minera.

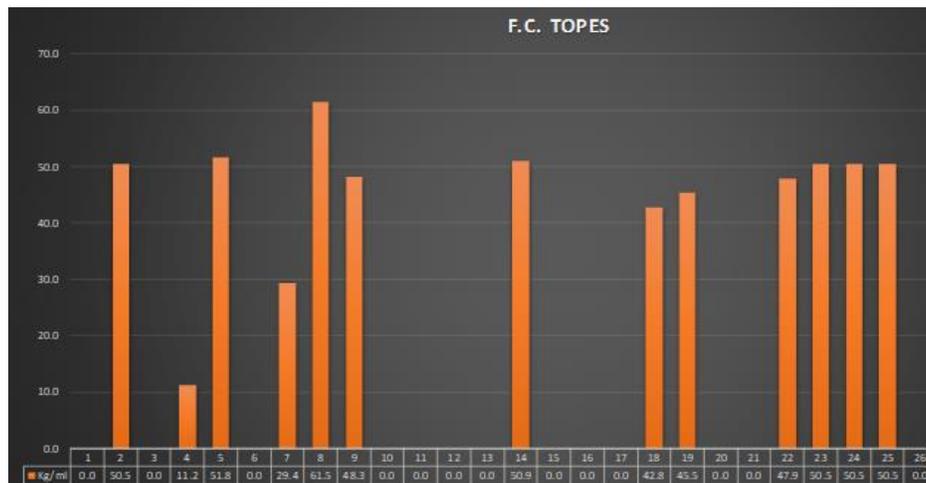


Fig. 9 Cuadro de control del factor de carga en topes del Rebaje 1 y Rebaje 2

Fuentes: Unidad minera

## 1.2. Beneficios de la metodología *LSS*

El principal propósito para implementar la metodología *LSS* a un proceso de cualquier industria, es eliminar los desperdicios para agilizarlo y aumentar la eficiencia de producción por medio de la reducción o eliminación de la variabilidad.

Los beneficios generados por la metodología son críticos para la viabilidad y aceptación del proyecto *LSS* por la alta gerencia de la empresa. Una ventaja de la metodología es que los resultados de los proyectos son medibles y tangibles; es decir, el beneficio económico se cuantifica por el aumento de la rentabilidad del producto o servicio.

Los principales beneficios al implementar la metodología son:

- Aumentar la rentabilidad
- Mejorar la estrategia de gestión de negocios
- Mayor protección del medio ambiente
- Mejorar el ambiente laboral

Al momento de implementar adecuadamente la metodología *LSS*, se pueden tener varios beneficios. Sin embargo, para alcanzar el rendimiento óptimo de un proceso generalmente es necesario implementar varias iteraciones de un proyecto *LSS*, pero hay casos extraordinarios donde un solo proyecto es más que suficiente para alcanzarlo.

Al tratar de introducir la metodología *LSS* a la industria minera, se busca emplear las herramientas administrativas para agilizar el proceso de extracción a través de una comunicación efectiva entre los departamentos internos y usar las herramientas estadísticas para controlar los procesos de extracción por medio de una supervisión sencilla y eficaz de los elementos claves.

Es importante aclarar que la metodología es la que se debe adaptar a la minería para evitar burocratización. Esto para realizar una implementación práctica y sistemática, es decir, en muchas ocasiones sólo es necesario implementar una o varias herramientas de la metodología *LSS* para solucionar el problema dentro de un proceso minero.

## 2. Planteamiento del caso práctico

En una mina subterránea que emplea el método de *Cuartos y pilares con relleno de tepetate* se extraen óxidos primarios y sulfuros secundarios de cobre. La producción mensual de la mina en el 2018 fue 160,000 *ton* con una ley mineral de 0.9 a 1.4  $\frac{g\ Cu}{ton}$ .

El sistema de minado debe ser continuo y estar controlado para cumplir el tonelaje de mineral requerido para la construcción de las pilas de lixiviación y producir cátodos de cobre con pureza del 99.999%.

En el primer trimestre del 2019, la construcción de la pila de lixiviación presentó un retraso por falta de mineral extraído. El presupuesto mensual de tumbe no se alcanzó debido a que se tuvieron problemas en la eficiencia de disparo en los topes de desarrollo y retraso la generación de banco de producción.

Una posible solución consiste en implementar la metodología *Lean Six Sigma* al proceso de barrenación y voladura. Además, dicha metodología podría ayudar a agilizar el proceso y reducir aproximadamente un 10% el costo de cuele de obra (barrenación y voladura).

El primer intento de implementación de la metodología *LSS*, se realizaría en el Rebaje 1 y en el Rebaje 2 porque su presupuesto diario es de 800 *ton*.

Se desarrolló un proyecto de mejora *LSS* para los procesos de barrenación y voladura. El objetivo principal de este consiste en disminuir un 10% el costo de cuele de obra y mejorar entre un 10% y 25% la eficiencia de disparo en los topes de desarrollo (0.40 a 1.0 *m*).

Específicamente, el beneficio económico se obtendrá eliminando los retrabajos del proceso y disminuyendo los insumos de barrenación y voladura. Para cuantificar este beneficio se realizó un análisis financiero basado en el costo unitario del cuele de obra (*costo barrenación + costo de voladura*).

Al mejorar la calidad de la voladura se espera disminuir los trabajos de amacice y los elementos de fortificación; además de generar un perfil granulométrico adecuado.

## 2.1. Definición de la problemática

En esta primera iteración, se analiza el proceso de barrenación en los topes de desarrollo del Rebaje 2. Estos últimos, se eligieron por ser las obras que han presentado mayor deficiencia de avance lineal en el mes de enero del 2019.

Lo anterior provocó que en los meses posteriores el asesor de mina tuviera que presupuestar treinta disparos al mes por la alta variabilidad en los avances (3.5 a 4.6 m) para tener margen de maniobra para poder cumplir el presupuesto mensual de noventa metros lineales.

El primer paso para aplicar la metodología es definir el proyecto, así como los alcances y limitaciones. Por tal motivo, se elaboró un diagrama de proyecto que muestra de forma general los objetivos principales, el cronograma de actividades y los productos elaborados. Posteriormente se recabó la información sobre los avances de disparo en los topes de desarrollo del Rebaje 2 del 26 de enero al 23 de febrero del 2019.

A continuación, se muestra los documentos recabados de los topes de desarrollo que presentaron problemas durante el lapso estudiado.

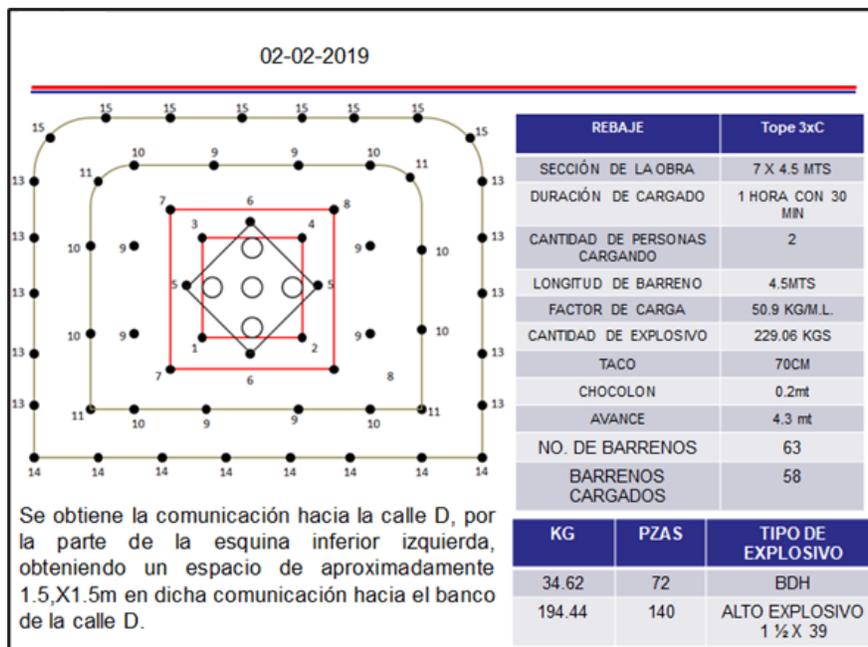


Fig. 10 Documentación del tope 3-C del Rebaje 2

Fuentes: Unidad minera

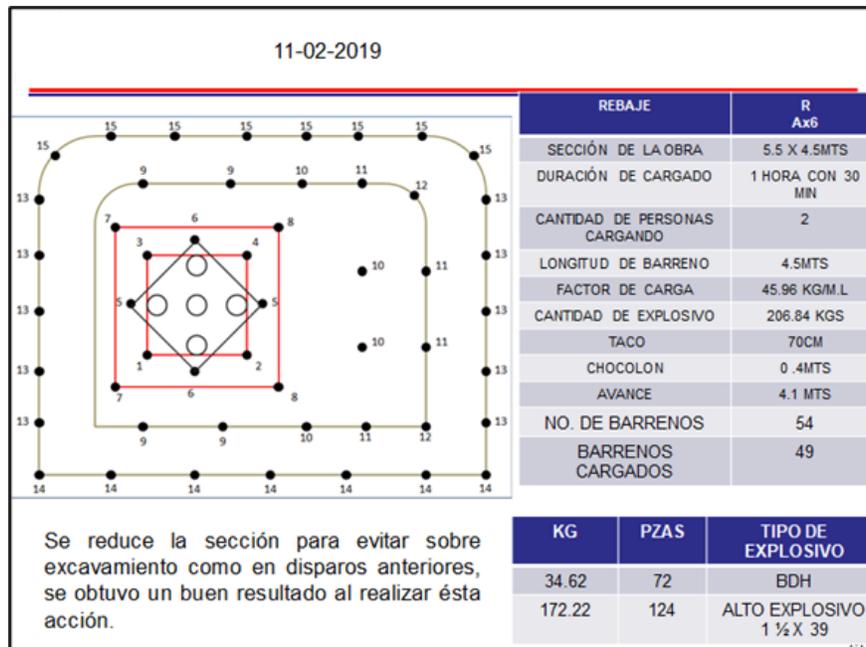


Fig. 11 Documentación del tope A-6 del Rebaje 2  
Fuentes: Unidad minera

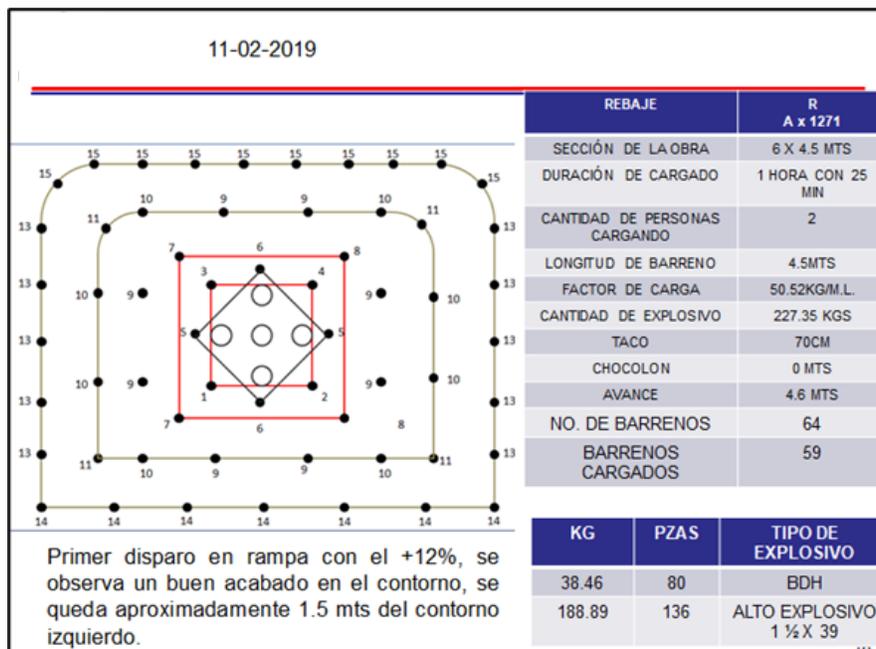


Fig. 12 Documentación del tope A-1271 del Rebaje 2  
Fuentes: Unidad minera

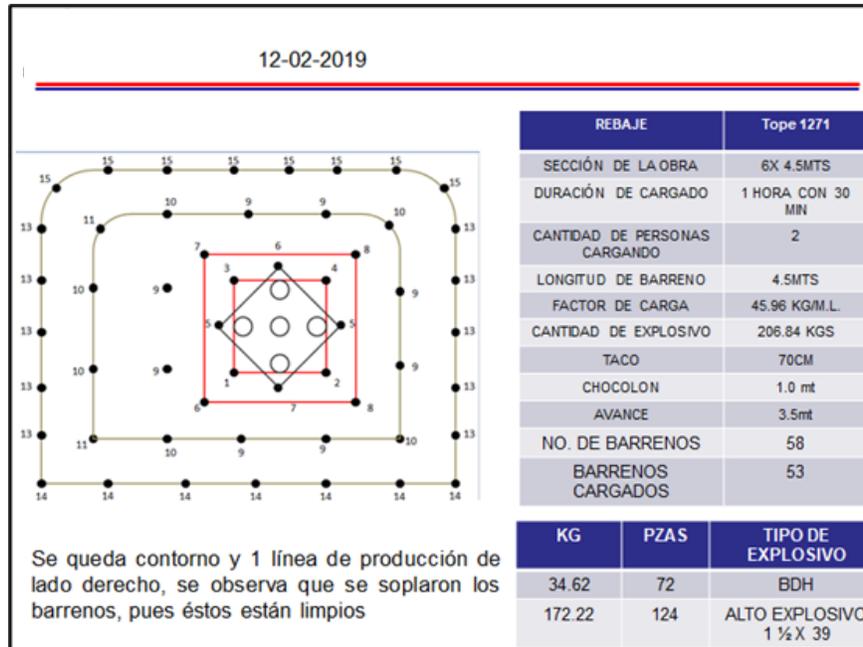


Fig. 13 Documentación del tope 1271 del Rebaje 2  
Fuentes: Unidad minera

Los anteriores reportes de voladura son evidencia de la problemática en la eficiencia de disparo en los topes de desarrollo del Rebaje 2. Por lo tanto, se considera adecuado implementar la metodología *LSS* a los procesos de barrenación y voladura. La implementación se llevará a cabo por medio del marco referencia mostrado en la figura 1. En este escrito sólo se desarrollará la etapa de *Lean Initiation*, la cual consiste en evaluar el estado actual del proceso e identificar los desperdicios.

Para conocer el estado actual del proceso se empleará el modelo *DMAIC*. A continuación, se muestra un diagrama donde se visualizan de manera general las herramientas a utilizar en cada etapa del modelo para abordar la problemática.

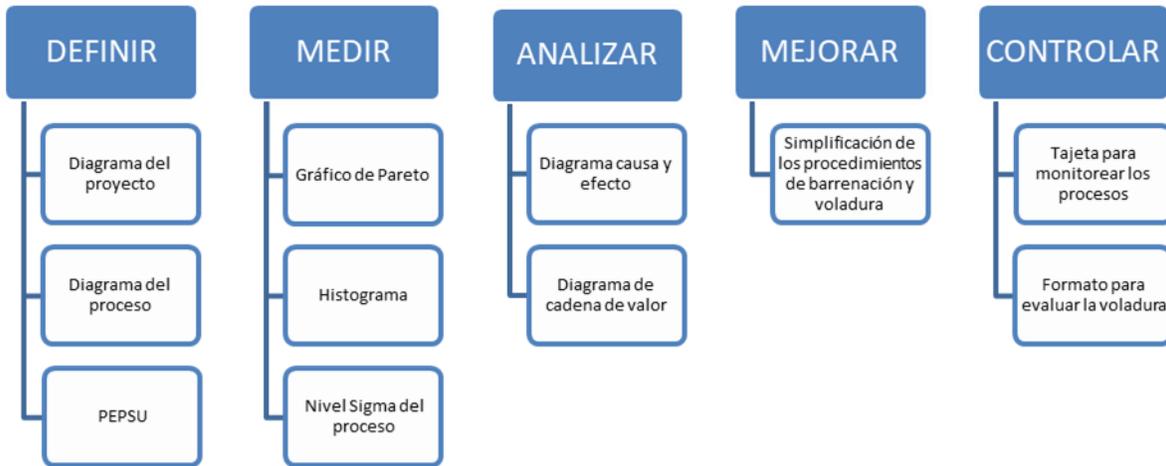


Fig. 14 Diagrama de propuestas de herramientas LSS  
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para identificar los “desperdicios” y su forma de ocurrencia dentro de un proceso minero se utilizará la Tabla 3, con el propósito de facilitar su identificación y agilizar el desarrollo del modelo *DMAIC*.

Dicha tabla se encuentra en el artículo “*A Lean Implementation Framework for the Mining Industry*” de los autores Seifullina, Er, Nadeem, Garza Reyes y Kurmar.

Tabla 3 Tipología de desperdicios en la minería

Fuente: Seifullina, Er, Nadeem, Garza Reyes y Kurmar, *A Lean Implementation Framework for the Mining Industry*”

<b>Desperdicios</b>
<b>Sobreproducción:</b> (Flynn and Vlok 2015) debido a que la capacidad de minado supera la capacidad de procesamiento de mineral, producción continua con sistema “empujar” (Dunstan <i>et al.</i> 2006; Chlebus <i>et al.</i> 2015)
<b>Espera:</b> inapropiadas condiciones en el ambiente de trabajo, p. ej. Falta de ventilación para remover polvos y gases (Klippel <i>et al.</i> 2008a), debido a la no disponibilidad de maquinaria y refacciones (Chlebus <i>et al.</i> 2015), equipo descompuesto o tiempo de inactividad en la planta metalúrgica y paros no programados (Indrawati y Ridwansyah 2015), fallas de equipos (Dunstan <i>et al.</i> 2006)
<b>Transporte innecesario:</b> diseños de transporte ineficiente (Garza Reyes <i>et al.</i> 2016) transporte del material del stock (Indrawati y Ridwansyah 2015), movimiento ineficiente del mineral extraído para llegar a su destino final (Dunstan <i>et al.</i> 2006), distancias largas (Flynn and Vlok 2015).
<b>Procesamiento incorrecto o sobre-procesamiento:</b> realización de tareas por empleado en lugar de operaciones paralelas, preparación de equipos auxiliares (p. ej. Afilado de brocas, operaciones de limpieza), método del proceso (p. ej. Barrenación en seco toma más tiempo comparado con el proceso de barrenación en húmedo) (Klippel <i>et al.</i> 2008a), proceso incorrecto debido por equipo descompuesto o falla del mismo (Oware <i>et al.</i> 2015) uso ineficiente de materiales (Indrawati y Ridwansyah 2015), sobre-procesamiento para obtener mejor ley mineral que la que el cliente paga (Dunstan <i>et al.</i> 2006).
<b>Inventario excesivo:</b> Alto inventario de refacciones (Chlebus <i>et al.</i> 2015), (Flynn and Vlok 2015) ineficiente administración de inventario (stockpile/escasez) (Dunstan <i>et al.</i> 2006).

<b>Movimiento innecesario:</b> ineficiente localización de instrumentos (Dunstan <i>et al.</i> 2006, Klippel <i>et al.</i> 2008a), transporte de material no disponible, incumplimiento de trabajadores (Indrawati y Ridwansyah 2015), transporte de operadores (Flynn and Vlok 2015).
--

<b>Defectos:</b> retrabajos o reparaciones (Dunstan <i>et al.</i> 2006), calidad del material (Indrawati y Ridwansyah 2015), fallas de equipos (p. ej. Fugas de fluidos) (Dunstan <i>et al.</i> 2006), defectos físicos en materiales (Flynn and Vlok 2015)
---

<b>Personal:</b> personal no capacitado (Indrawati y Ridwansyah 2015; Oware <i>et al.</i> 2015), ineficiente cambio de turno ((Indrawati y Ridwansyah 2015) ausentismo (Dunstan <i>et al.</i> 2006), incorrecta asignación de trabajos al personal (Klippel <i>et al.</i> 2008a), comunicación inapropiada castillo <i>et al.</i> 2015; Flynn and Vlok 2015).
---

### 2.1.1. Diagrama del proyecto

El diagrama de proyecto o *Project Charter* por su nombre en inglés, es el punto de inicio para implementar la metodología *Lean Six Sigma*. La realización de dicho documento se realiza en la etapa de definir.

Es una herramienta básica que simplifica la información del proyecto de mejora, establece el alcance, las limitantes y los involucrados, así como las responsabilidades de cada persona y/o áreas de la empresa.

Por último, es importante mencionar que este documento se puede modificar con el desarrollo del proyecto, por lo cual es importante documentar las revisiones y actualizaciones.

En el Anexo 1, se presenta el diagrama del proyecto elaborado.

### 2.1.2. Diagrama del proceso

El objetivo principal de un diagrama del proceso es identificar el proceso principal, los procesos complementarios y los procesos "cuello de botella". Además, al complementarlo con el procedimiento de trabajo de la empresa facilita la tarea de identificar los errores operativos.

Para conocer el proceso se realizó un recorrido desde la perspectiva del operador. Durante el recorrido se recomienda anotar los frentes visitados, el operador observado y tomar los tiempos de operación desde el inicio del turno.

El tiempo para conocer el proceso dependerá de la experiencia de la persona que realice dicha labor. Pero lo recomendable, es observar el proceso durante dos semanas y entrevistar a los operadores sobre cómo realiza su trabajo, así como las problemáticas que identifica durante el desarrollo de este.

En el Anexo 2, se muestran los diagramas de los procesos de barrenación, voladura y servicio auxiliares. De los procesos antes mencionados, se establece que el proceso de barrenación y voladura es el principal y el restante es el complementario.

Al elaborar dichos diagramas, se identificaron las actividades que agregan valor al proceso de extracción de mineral. En la Tabla 4 se colocan dichas actividades y su tiempo promedio de duración.

Tabla 4 Distribución de tiempo del proceso de barrenación y voladura  
Fuente: Unidad minera

Proceso	Actividad	Tiempo aproximado [mm]
Barrenación	Barrenación	90 a 120
Cargado y voladura	Cargar barrenos de cuña y pata	30 a 45
	Cargar ayudantes y barrenos de contorno	10 a 25
	Amarrar "noneles" al cordón detonante	10 a 30
	Detonar cordón detonante	5 a 10
Servicios de barrenación	Colocar servicios auxiliares	30 a 60

Para realizar un estudio a detalle de los procesos de barrenación y voladura se propuso realizar un estudio de tiempos y movimientos para cuantificar el tiempo operativo, debido a que el tiempo especificado en la Tabla 4 es aproximado.

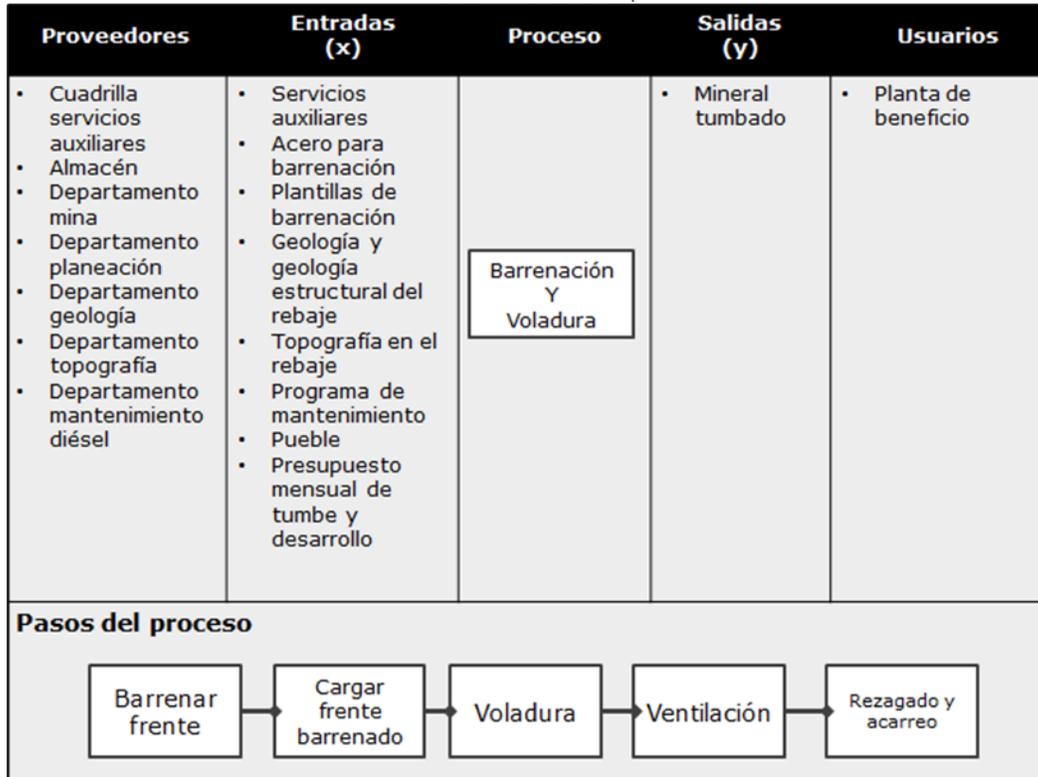
El estudio de tiempos y movimientos se detalla en el siguiente capítulo.

### 2.1.3. Diagrama *PEPSU*

El diagrama *PEPSU* (Proveedores-Entradas-Proceso-Salidas-Usuarios) se realiza después del diagrama del proceso y es para identificar los recursos materiales y humanos necesarios para realizar el proceso de extracción de mineral.

Esta herramienta busca agilizar el proceso, detectar los desperdicios presentes en el proceso y disminuir los tiempos muertos y de espera. En la Tabla 5 se muestra el Diagrama *PEPSU* elaborado después del análisis del proceso de barrenación y voladura.

Tabla 5 Diagrama PEPSU  
Fuente: Direktor Group



Al analizar el diagrama *PEPSU*, se observa que existen siete proveedores internos y que su ausencia afecta significativamente el desarrollo del proceso.

Lo anterior es comprobado por la siguiente observación que el autor hizo al estudiar el proceso:

*“El departamento de geología determina los frentes de mineral antes de ser tumbados y el departamento de topografía marca los rumbos y pisos de los rebajes. Entonces, si el departamento de mina no tiene dicha información se ve obligado a retrasar sus tareas o realizarlas con el alto riesgo de afectar la calidad del proceso.”*

Todos los proveedores tienen un impacto en el proceso, pero los departamentos de Geología y Topografía se catalogan como proveedores principales porque su deficiencia afecta significativamente al proceso. En el primer caso, se afecta la ley de cabeza mientras en el segundo se disminuye la seguridad de la mina por el mal cuele de obras y pérdida de

mineral por el mal trazo de los pisos. Los proveedores restantes, generan tiempos de espera o muertos que afectan el ritmo de producción de la mina.

Específicamente, los programas de mantenimiento preventivo son importantes para determinar el tiempo disponible de la maquinaria y evitar tiempos muertos por mantenimientos no planeados.

Posteriormente, la ausencia de los materiales necesarios para la barrenación genera tiempos de espera y disminuye la productividad de la empresa. Por otra parte, la falta de los servicios auxiliares ocasiona tiempos muertos prolongados.

Por último, la supervisión tiene un paradigma porque se enfoca en corroborar que todos realicen su trabajo, pero en realidad un supervisor debe ser un facilitador que deroga tareas, proporciona el material necesario a los empleados y corrobora que las condiciones de trabajo sean las adecuadas.

### 3. Mediciones realizadas

En esta etapa es importante tener información precisa y exacta sobre el proceso de barrenación y voladura para poder establecer correctamente el estado actual del proceso y de esta forma saber si el grado de la mejora es una meta alcanzable.

Se utilizaron indicadores de operación porque permiten identificar las áreas de mejora y las posibles causantes de las ineficiencias dentro del proceso de cuele de obra.

En este punto del proyecto se plantearon las siguientes preguntas

- ¿Los datos muestreados son los correctos?
- ¿Cuántas muestras son representativas?
- ¿El indicador operativo es el adecuado?

Pero todo dependerá del tipo de proyecto *LSS*, la teoría estadística y la experiencia del líder del proyecto. En este caso, como el proceso principal está constituido por el proceso de barrenación y voladura, es pertinente y recomendable tener la misma cantidad de indicadores para cada uno.

Los indicadores que se eligieron para el desarrollo del proyecto son:

- Tiempos y movimientos de barrenación
- Consumo de acero de barrenación
- Factor de carga de la voladura
- Avances de los disparos en los topes de desarrollo

Para la toma de tiempos y movimientos del proceso de barrenación con *jumbo*, se tomaron muestras durante dos semanas porque en diversos manuales técnicos indican que cuando el observador tiene poca experiencia es lo más recomendable. En caso contrario, dicha tarea se puede hacer en una semana.

El análisis del consumo de acero, el factor de carga y del avance del disparo en los topes de desarrollo se realizó a partir de los registros de la unidad minera.

### 3.1. Tiempos y movimientos

Durante el estudio de tiempos realizado en la minera se visitó el rebaje 1 y el rebaje 2, pero se enfocó en observar el proceso de barrenación en el segundo de estos. En la Tabla 6, se especifica la actividad observada y la frecuencia de las observaciones.

Tabla 6 Lugares visitados en Unidad minera  
Fuente: Unidad minera

Ubicación		Ciclo de
Rebaje	Calle	barrenación
Rebaje 2	CC-A	2
Rebaje 2	CC-B	3
Rebaje 2	CC-D	3
Rebaje 1	1620 - C3	4
Rebaje 1	1620 - C95	3
Rebaje 1	1620 - C2	3
Rebaje 1	1620 - C96-C4	1

De las diecinueve muestras obtenidas, sólo en cinco de ellas se profundizó el análisis de tiempos. Dichas muestras corresponden a los topes de desarrollo del Rebaje 2.

El estudio de tiempos tiene como objetivo determinar el tiempo disponible, el tiempo complementario y tiempo improductivo en la barrenación horizontal con *jumbo*. Los cuales se describen a continuación:

- **Tiempo operativo:** tiempo total de las actividades que son vitales para realizar el proceso de barrenación
- **Tiempo complementario:** tiempo total de las actividades que son necesarias para realizar el proceso de barrenación. Dentro de la metodología *LSS*, se considera muda tipo I (actividades no vitales pero necesarias)
- **Tiempo improductivo:** tiempo total de las actividades que afectan el rendimiento del proceso de barrenación. Dentro de la metodología *LSS*, se considera muda tipo II (desperdicios)

Además, es importante especificar que los roles de trabajo en la mina se realizan en tres turnos de ocho horas cada uno, de los cuales el turno de primera es el que tiene el mayor tiempo disponible y todo el personal se encuentra laborando en la mina. En cambio, el turno de segunda se ve afectado por el horario de voladura (17:00 a 17:30 hrs) y en el último

turno disminuye la cantidad de personal. Entonces, considerando las condicionantes anteriores se decidió realizar el estudio de tiempos y movimientos en el turno de primera.

Para la toma de tiempos se utilizó el siguiente formato de la Tabla 7:

Tabla 7 Ejemplo de formato para medir indicadores claves para el proceso de barrenación

Fuente: Unidad minera

Indicadores para el proceso de barrenación					
	día/mes/año	día/mes/año	día/mes/año	día/mes/año	día/mes/año
Lugar					
Operador					
Turno					
Tipo de roca					
Percusión					
Rotación					
Avance					
N° jumbo					
N° barrenos					
Barra [ft]					
Broca [mm]					
Tiempo operativo					
Tiempo complementario					
Tiempo improductivo					
<b>Total</b>					

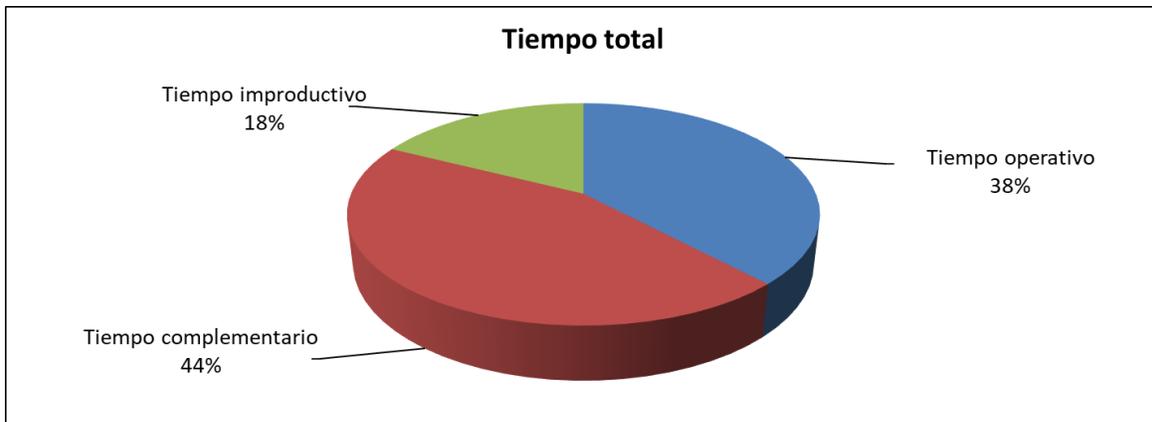
En la Tabla 8 se especifican las actividades y el tipo de tiempo que genera cada una de ellas. De igual forma, si la actividad se considera un desperdicio, en la última columna se especifica el tipo de desperdicio.

Tabla 8 Estudio de tiempos

Fuente: Unidad minera

	Actividad	Tiempo [hrs:mm:ss]			Tipo de desperdicio
		Productivo	Complementario	Improductivo	
1	Transporte de la caseta de vigilancia al pueblo		00:25:39		Ninguno
2	Recibir y entregar pueblo		00:09:13		Ninguno
3	Transporte del pueblo al rebaje		00:19:39		Ninguno
4	Transporte del comedor al rebaje		00:07:44		Ninguno
5	Trasladar equipo al rebaje	00:13:54			Ninguno
6	Revisar lugar de trabajo		00:03:40		Ninguno
7	Checar equipo de barrenación	00:05:08			Ninguno
8	Marcar plantilla de barrenación	00:13:05			Ninguno
9	Acondicionar extensión y manguera del agua	00:08:57			Ninguno
10	Colocar barricada	00:03:10			Ninguno
11	Colocar broca	00:02:13			Ninguno
12	Barrenar frente	01:49:36			Ninguno
13	Cambiar de posición al <i>jumbo</i>	00:03:09			Ninguno
14	Cambiar acero (barra y/o extensión)	00:14:31			Ninguno
15	Cambiar broca	00:01:33			Ninguno
16	Recoger extensión y manguera	00:10:38			Ninguno
17	Comida		00:38:30		Ninguno
18	Supervisión		00:06:02		Ninguno
19	Esperar órdenes			00:03:45	Espera
20	Esperar rezagado de frente			00:03:09	Espera
21	Mantenimiento eléctrico no programado			00:06:49	Retrabajo
22	Negligencia del operador			00:14:48	Talento de la gente
23	Problemas de servicios auxiliares			00:11:07	Defecto
24	Nivelar piso (LHD)			00:02:07	Defecto
25	Falta de materiales (broca, barra, manguera)			00:21:59	Inventario
26	Barra o extensión atascada			00:03:40	Defecto
27	Barra despuntada			00:19:25	Defecto
28	Alistarse (entrada y salida)		01:00:00		Ninguno
29	Transporte del rebaje al pueblo		00:15:01		Ninguno
30	Transporte del pueblo a la caseta de vigilancia		00:32:08		Ninguno
	Tiempo total	03:05:54	03:37:36	01:26:49	8:10:19

En la gráfica 1 se muestra la distribución ponderada obtenida con base en los datos muestreados.



Gráfica 1 Tiempo disponible total  
Fuente: Unidad minera

Para eliminar el tiempo improductivo, es necesario identificar el tipo de desperdicios que lo integran. Por tal motivo, en la Tabla 9 se muestran los tipos de desperdicios identificados y su frecuencia.

Tabla 9 Tipología de desperdicios  
Fuente: Unidad minera

	Desperdicios					TOTAL
	Espera	Re-trabajo	Defecto	Inventario	Talento de la gente	
No. de desperdicios por tipo	2	1	4	1	1	9
% de desperdicios por tipo	22%	11%	44%	11%	11%	100%

A partir de la identificación de los desperdicios. El siguiente paso es conocer el tiempo muerto generado por cada una de ellas para detectar las principales causantes de este tiempo. Entonces, se elaboró la Tabla 10 donde se identifican las actividades con mayor contribución al tiempo improductivo.

Tabla 10 Tiempo improductivo

Fuente: Unidad minera

Tiempo improductivo					
Actividad	Desperdicio	T [hrs:mm:ss]	Parcial [%]	T.a. [hrs:mm:ss]	Acumulado [%]
Falta de materiales	Espera	01:49:57	25.55%	01:49:57	25.55%
Barra despuntada	Espera	01:37:03	22.55%	03:27:00	48.10%
Negligencia por parte del operador	Re-trabajo	01:14:00	17.20%	04:41:00	65.30%
Problemas de servicios auxiliares	Talento de la gente	00:55:37	12.92%	05:36:37	78.22%
Mantenimiento eléctrico no programado	Defecto	00:34:06	7.92%	06:10:43	86.15%
Barra o extensión atascada	Defecto	00:18:20	4.26%	06:29:03	90.41%
Esperar rezagado de frente	inventario	00:15:43	3.65%	06:44:46	94.06%
Esperar órdenes	Defecto	00:15:00	3.49%	06:59:46	97.54%
Nivelar piso (LHD)	Defecto	00:10:34	2.46%	07:10:20	100.00%
<b>Total</b>		<b>7:10:20</b>	<b>100.00%</b>		

Con la información obtenida en la tabla anterior se construyó el diagrama de Pareto mostrado en la Gráfica 2, para determinar cuáles son las actividades que se deben eliminar para disminuir el tiempo improductivo y agilizar el proceso de barrenación.



Gráfica 2 Gráfico de Pareto

Fuente: Unidad minera

Como ninguna empresa tiene los recursos humanos y materiales para eliminar todos los problemas dentro de un proceso, el diagrama de Pareto permite identificar las actividades "poco vitales" que deben ser eliminadas para disminuir al máximo el tiempo improductivo dentro del proceso. Estas actividades son:

- Falta de insumos
- Barra despuntada
- Negligencia del operador

- Problemas de servicios auxiliares

Lo anterior es resultado de la regla 80/20 de Pareto. Es decir, la suma de los tiempos de las actividades enlistadas es el 80% del tiempo improductivo.

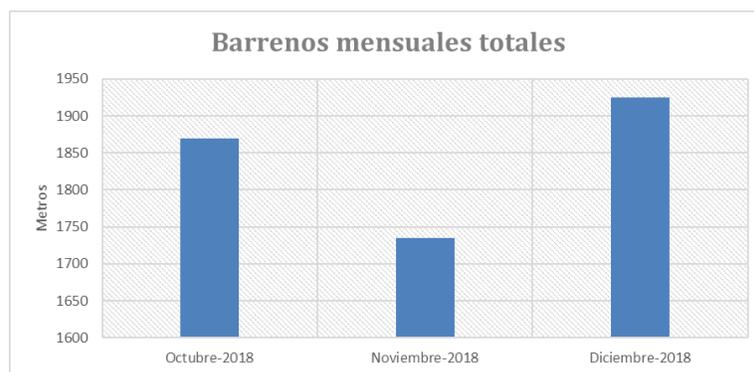
## 3.2. Consumo de acero

El consumo de acero es un indicador que se expresa cuantitativamente y se utiliza para realizar una comparación entre los metros barrenados y el acero consumido por operador. Lo anterior sólo indica que operador es más ágil al momento de barrenar pero se tiene la incertidumbre si dichos barrenos tienen la calidad adecuada porque no se muestrea la plantilla barrenada.

Para fines de análisis, se consideró que todos los operadores generan barrenos de calidad (limpios, sin agua, paralelos y con una profundidad promedio de 4.40 m) y los rendimientos teóricos especificados por JSI Rock Tools son de 1,302 m.l. para la barra hexagonal y de 594 m.l. para la broca esférica para las propiedades geomecánicas del rebaje.

Al analizar el registro de consumo de acero, se observó que no se especifican los lugares donde este se utiliza. Por lo tanto, la medición de consumo de acero es general.

En la Gráfica 3 se muestra la información de barrenos mensuales totales de octubre a diciembre del 2018.

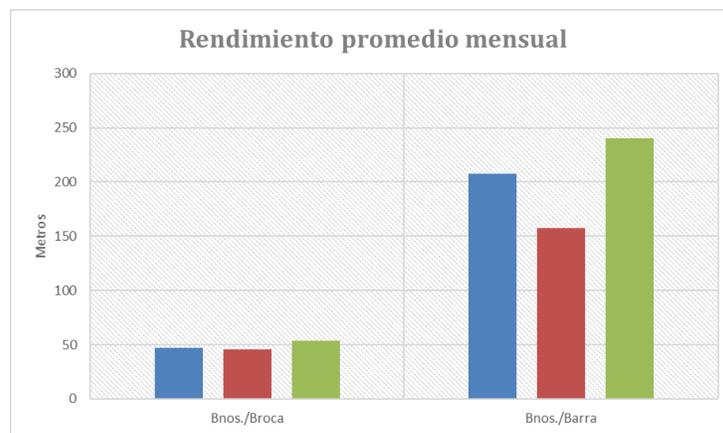


Gráfica 3 Barrenos mensuales totales  
Fuente: Unidad minera

La información anterior fue complementada con entrevistas a los trabajadores, supervisores de mina y asesor de mina.

De la entrevista con los supervisores y trabajadores, se tuvo conocimiento que en el mes de noviembre se presentaron problemas con el suministro de agua (*causa especial*<sup>23</sup>) lo cual provocó que varios días no se pudiera barrenar, dando como resultado la disminución de barrenos mensuales.

El siguiente paso consistió en cuantificar el rendimiento de las brocas y barras a través del número de barrenos perforados con cada una. La Gráfica 4 se muestran los resultados.



Gráfica 4 Rendimiento mensual promedio  
Fuente: Unidad minera

En la gráfica 4, se observa que las brocas tienen un rendimiento similar en los meses muestreados. Por otra parte, las barras hexagonales tienen un rendimiento muy variable entre cada mes. Se tiene una diferencia de cincuenta barrenos entre octubre-noviembre y de ochenta y tres entre noviembre-diciembre, lo cual resalta el problema de *barra despuntada* identificado en el gráfico de Pareto.

En la Tabla 11 se calcula la eficiencia de barrenación de la broca y barra; se considera que los rendimientos teóricos son de 135 barrenos/broca y 296 barrenos/barra.

---

<sup>23</sup> En la metodología *LSS*, una causa especial es aquel evento o situación poco probable o extraordinarios que afecta la ejecución del proceso.

Tabla 11 Eficiencia de barrenación  
Fuente: Unidad minera

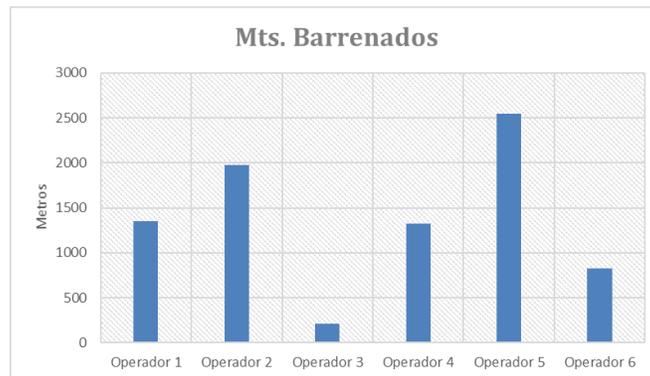
Mes	Eficiencia de barrenación			
	Bnos./Broca	Bnos./Barra	Bnos./Broca	Bnos./Barra
Octubre-2018	47	208	35%	70%
Noviembre-2018	46	158	34%	53%
Diciembre-2018	53	241	40%	81%

Los resultados mostrados en la tabla 11 indican que el acero de barrenación tiene un rendimiento deficiente. Las posibles causas de este rendimiento podrían ser:

- Negligencias del operador
- Acero defectuoso por parte del proveedor
- Rendimientos teóricos altos
- Control deficiente en el consumo de acero de barrenación

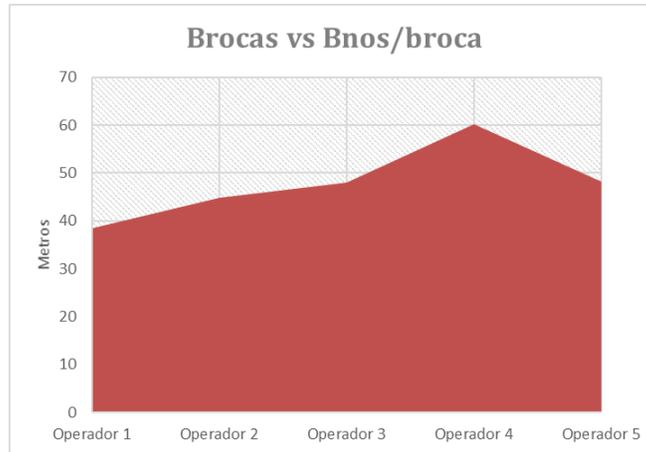
Por último, se realizó una comparativa de consumo de acero vs barrenos por broca. Este análisis se enfoca en las brocas por ser el acero con peor rendimiento.

En la Gráfica 5 se muestran los datos del mes de octubre y observa que el operador #5 fue el más ágil con 2,543.2 *m.l.*, seguido del operador #2 con 1,971.2 *m.l.* y operador #1 con 1,355.2 *m.l.*



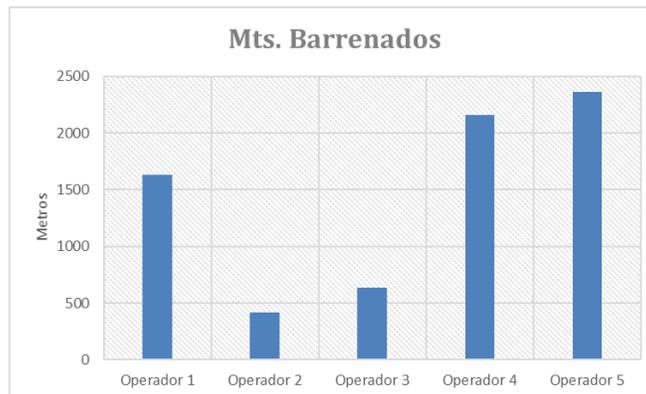
Gráfica 5 Metros barrenados vs Operador en octubre 2019  
Fuente: Unidad minera

Por otra parte, en el Gráfica 6 se muestra el rendimiento de broca por operador. El operador #4 tiene el rendimiento de 60 *bnos./broca*; seguido por el operador #3 y el operador #5 con 48 *bnos./broca*.



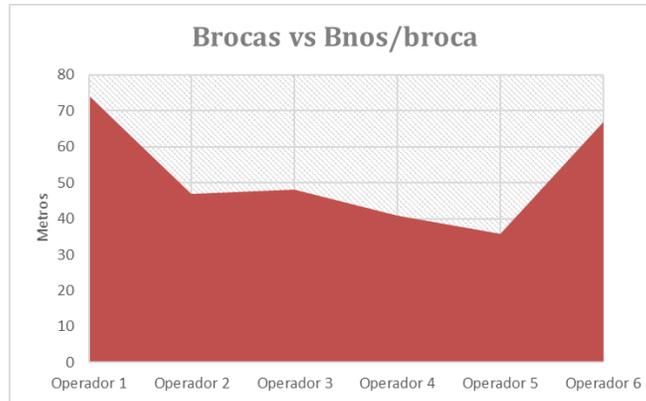
Gráfica 6 Brocas vs Barrenos por broca en octubre 2019  
Fuente: Unidad minera

En la Gráfica 7, los datos correspondientes al mes noviembre indicaron que el operador #5 fue el más ágil con 2,362.8 *m.l.*, seguido del operador #4 y el operador #1 con 2,156 *m.l.* y 1,632.4 *m.l.* respectivamente.



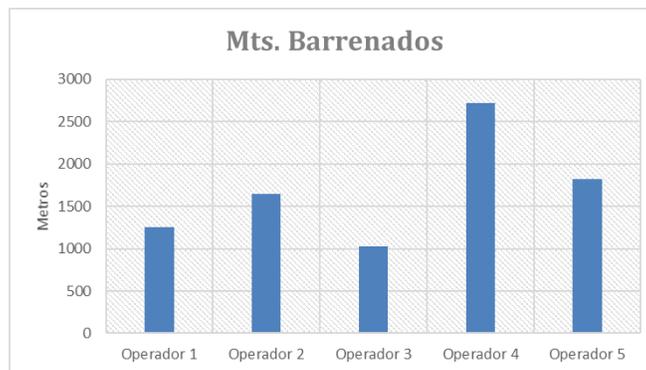
Gráfica 7 Metros barrenados vs Operador en noviembre 2019  
Fuente: Unidad minera

Por otra parte, en la Gráfica 8 se observa que el operador más ágil no tiene el mejor rendimiento por broca. El mayor rendimiento fue de 74 *bnos./broca* por el operador #1, seguido de 67 *bnos./broca* por parte del operador #6 y de 48 *bnos./broca* del operador #3.



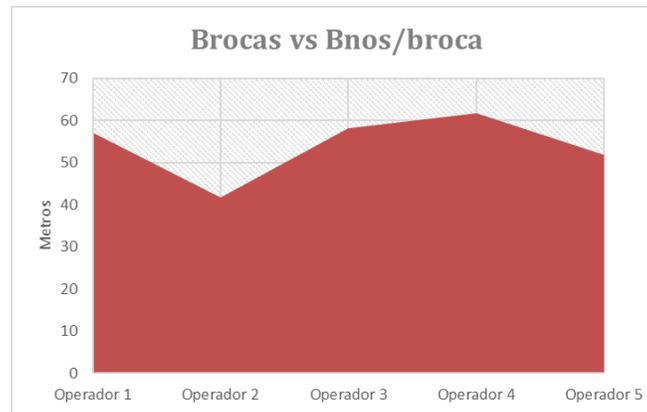
Gráfica 8 Brocas vs Barrenos por broca en noviembre 2019  
Fuente: Unidad minera

Los datos de la Gráfica 9 del mes de diciembre, indica que el operador #4 volvió a ser el operador más ágil con 2,714.8 m.l., seguido por el operador #5 con 1,826 m.l. y el operador #2 con 1,650 m.l.



Gráfica 9 Metros barrenados vs Operador en diciembre 2019  
Fuente: Unidad minera

A diferencia de los meses anteriores, en la Gráfica 10 se observa que el operador #4 fue el operador más ágil con mejor rendimiento en broca, su rendimiento fue de 62 bnos./broca. El operador #3 fue el segundo mejor rendimiento con 58 bnos./broca y el operador #1 fue el tercero con 57 bnos./broca.



Gráfica 10 Brocas vs Barrenos por broca en diciembre 2019  
Fuente: Unidad minera

Después de analizar las gráficas, se concluye que los descuidos y omisiones del operador, que en ocasiones pudieran clasificarse como negligencia, son un factor que afecta la eficiencia del proceso y su solución resulta clave para agilizar el proceso de barrenación.

Se recomienda capacitar a los operadores que presentan la mayor cantidad de barras despuntadas y realizar pláticas de concientización con todos los operadores sobre el impacto que genera un buen proceso de barrenación en la voladura.

Además, se detecta que los roles de las cuadrillas no son los correctos, porque los operadores uno y tres de la cuadrilla del segundo turno, tienen un bajo rendimiento por no tener frentes disponibles para barrenar. Lo anterior causa una sobrecarga de trabajo a los demás operadores ocasionando que antepongan la rapidez por la calidad de la barrenación.

### 3.3. Avance de voladura

Esta medida indica el estado actual del proceso principal, es decir de la barrenación y voladura. Esto es porque la calidad de la barrenación influye directamente en el avance de disparo generado por la voladura.

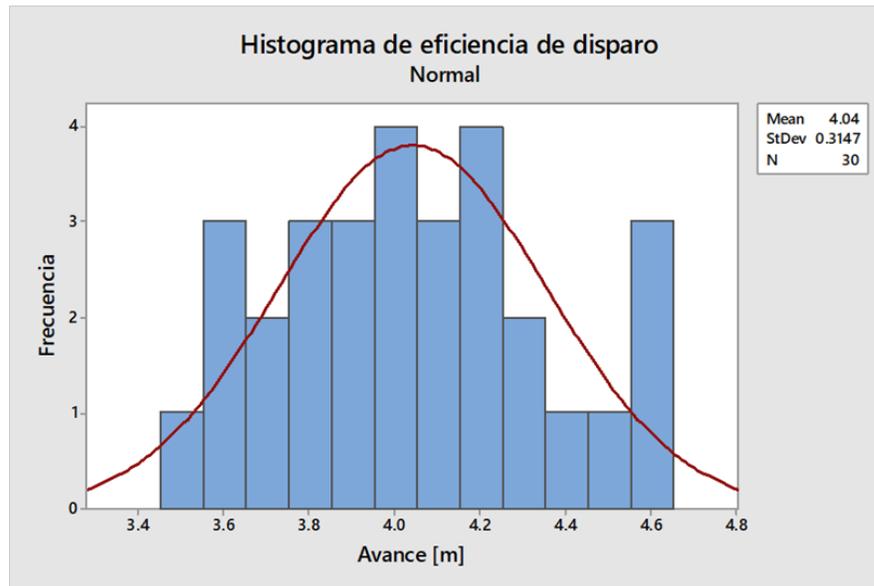
Antes de mostrar la información analizada, es importante mencionar que en el mes de marzo del 2019 se planificaron 30 disparos mensuales en los rebajes para tener margen de maniobra que permitiera cumplir el presupuesto de 90 metros lineales; lo anterior debido a la variabilidad de los avances de disparo de los meses anteriores.

El análisis de los avances de disparo se enfocó en el Rebaje 2 del 26 de enero al 23 de febrero del 2019. La información que se obtuvo se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12 Eficiencia de disparo  
Fuente: Unidad minera

	Fecha	Lugar	Avance estimado [m]	Avance real [m]	Chocolón [m]
1	26/01/2019	3-C	4.50	4.00	0.50
2	26/01/2019	Rampa 1271	4.50	3.80	0.70
3	27/01/2019	A-1271	4.50	4.20	0.30
4	28/01/2019	A-5	4.50	3.70	0.80
5	30/01/2019	A-1271	4.50	3.90	0.60
6	31/01/2019	A-5	4.50	3.60	0.90
7	02/02/2019	1543 nicho	4.50	4.10	0.40
8	02/02/2019	1271	4.50	3.60	0.90
9	03/02/2019	3-C	4.50	4.30	0.20
10	04/02/2019	E-9	4.50	4.60	-0.10
11	05/02/2019	A-1271	4.50	3.90	0.60
12	05/02/2019	D-10	4.50	4.30	0.20
13	06/02/2019	A-6	4.50	4.00	0.50
14	07/02/2019	1271	4.50	3.80	0.70
15	08/02/2019	E-10	4.50	4.20	0.30
16	09/02/2019	A-1271	4.50	4.00	0.50
17	11/02/2019	E-10	4.50	4.60	-0.10
18	11/02/2019	A-6	4.50	4.10	0.40
19	12/02/2019	A-1271	4.50	4.60	-0.10
20	13/02/2019	1271	4.50	3.50	1.00
21	13/02/2019	A-1271 izq.	4.50	4.20	0.30
22	14/02/2019	E-11	4.50	4.40	0.10
23	17/02/2019	A-6	4.50	3.60	0.90
24	18/02/2019	A-1271 izq.	4.50	4.00	0.50
25	19/02/2019	A-6	4.50	4.50	0.00
26	19/02/2019	D-10	4.50	4.20	0.30
27	20/02/2020	D-3	4.50	3.70	0.80
28	21/02/2020	Rampa 1271	4.50	3.80	0.70
29	21/02/2020	Rampa 1271	4.50	4.10	0.40
30	23/02/2020	Rampa 1271	4.50	3.90	0.60

Con los datos obtenidos, se realizó un histograma de frecuencia de los avances de disparo. Lo anterior facilitó el análisis de los datos porque se pudo construir una función de probabilidad que se muestra en la Gráfica 11.



Gráfica 11 Histograma de eficiencia de disparo  
Fuente: Unidad minera

En la Gráfica 11 se muestra que los datos tienen una forma similar a una distribución normal y se puede calcular las medidas de tendencia central y dispersión.

Los datos normalizados son representados por la función de probabilidad que es representada por la línea roja. De esta, se observa una media de 4.04 m y una desviación estándar de 0.3147.

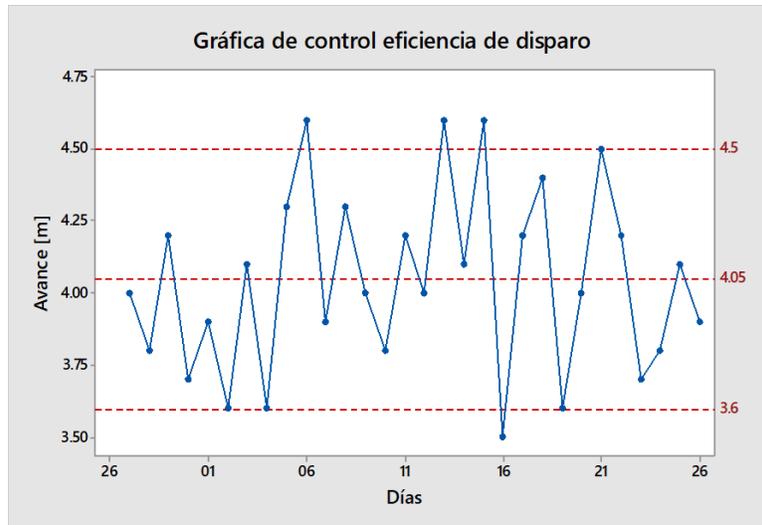
Con los datos anteriores, se determinó que el avance promedio en los topes de desarrollo es de 4.04 m y tienen una variación promedio del 15%. Para calcular el nivel sigma del proceso es necesario determinar los límites de control.

Para dicho fin, se utiliza una gráfica de control para representar visualmente los límites, así como la media y determinar si el proceso se encuentra bajo control.

El límite de control superior se estableció en 4.50 m por ser la longitud de la barra utilizada mientras el límite inferior se estableció en 3.60 m por

ser el 80% de la longitud de la barra. Esto último, debido a las propiedades geomecánicas del Rebaje 2.

En la Gráfica 12 se grafican los 30 datos de los avances de disparo, los límites superior e inferior de control, así como la media. Por último, se debe recordar que en el eje de abscisas siempre se coloca el factor del tiempo.



Gráfica 12 Gráfica de control de eficiencia de disparo  
Fuente: Unidad minera

Al analizar la gráfica de control, se determinó que las mediciones por arriba del límite de control superior se consideran resultados extraordinarios y no se consideran un problema. En cambio, los valores por debajo del límite inferior de control se consideran deficiencias.

Con base en los datos proporcionados, se concluye que el proceso está bajo control porque sólo se presenta un dato por debajo del límite superior. Pero no se tiene la eficiencia deseada porque más de la mitad de los datos están por debajo de la media.

Posteriormente, se calculó el nivel sigma y se determinaron los defectos por millón de oportunidades con los datos obtenidos de la función de probabilidad. Lo anterior ayudó a determinar la calidad del proceso principal.

Se empleó una calculadora proporcionada por la empresa *Direktor Group*, la cual se muestra en la figura 15. Los resultados obtenidos en dicha calculadora indican que el rendimiento del proceso es de 70.52%.

Lo anterior se puede interpretar como: de cada diez avances de disparos sólo siete tiene el avance esperado. Entonces, los disparos restantes son desperdicios y generan pérdidas monetarias.

Además, se determinó que se tendrán 294,752.13 defectos por cada millón de oportunidades. Dando como resultado un nivel sigma de 2.04, que indica que el proceso es poco eficiente.

Por último, es importante especificar que para tener una voladura efectiva se consideran las siguientes "oportunidades"<sup>24</sup>:

1. Obra simétrica
2. Contorno de obra simétrico
3. Perfil plano en la frente generada
4. Perfil granulométrico adecuado (sin "sobretamaños"<sup>25</sup>)
5. Avance de disparo mayor a 4.0 m

SIGMA LEVEL CALCULATOR - CONTINUOUS DATA

**Instructions:**

1) Enter Data in Gold Cells

2) Read Sigma Level in Blue Cells

3) At least one Specification Limit is required

Short term study, 1.5 Sigma shift assumed

Long term study, no 1.5 Sigma shift assumed

Continuous measurements are derived from a scale or continuum that is infinitely-divisible. Measurements such as time, temperature, weight, height, voltage, miles per hour, etc. Continuous measurements provide the greatest possible information content (within the boundaries of measurement device resolution) because values are represented directly, not classified into categories

[Click here to calculate Sigma Level for discrete data.](#)

Enter the Calculated Average, X-bar	4.04
Enter the Calculated Standard Deviation, s	0.3147
Enter the Upper Specification Limit, leave blank if none	4.5
Enter the Lower Specification Limit, leave blank if none	3.8
Z score for the Upper Specification Limit	1.46
% of data greater than the Upper Specification Limit	7.19%
Z score for the Lower Specification Limit	0.76
% of data less than the Lower Specification Limit	22.28%
% of output that does not exceed the Specification Limits (Yield)	70.52%
Defects per Million Opportunities (DPMO)	294,752.1302042170000
<b>Sigma Level</b>	<b>2.04</b>

**NOTE:** This calculator assumes that your data are normally distributed (bell-shaped) curve. If you are unsure, first perform a check for normality.

**NOTE:** These calculations assume that the process you are working with is stable. Process stability can be evaluated using process control charts.

Fig. 15 Calculadora de nivel sigma  
Fuente: Direktor Group

<sup>24</sup> Término utilizado en la metodología *LSS* para indicar las características deseadas de un producto o servicio.

<sup>25</sup> Término utilizado en un análisis granulométrico que se refiere a los tamaños de partículas mayores a los deseados.

## 4. Análisis del proceso

Después de la recolección e interpretación de los datos es necesario hacer un análisis para determinar la causa raíz que está generando la ineficiencia del disparo en los topes de desarrollo de los rebajes.

Para iniciar el análisis es recomendable agrupar las interpretaciones de las mediciones de la etapa anterior. Esto evitará perder el enfoque del problema y facilitará el análisis.

La primera medición realizada fue el estudio de tiempos y movimientos para el proceso de barrenación. El proceso antes mencionado ha presentado una gran variabilidad en la calidad de los barrenos y en el tiempo de barrenación.

El objetivo de este estudio contemplo determinar la distribución del tiempo operativo, complementario e improductivo dentro del primer turno en el rebaje 2.

La distribución de tiempo se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13 Distribución de tiempo operativo  
Fuente: Unidad minera

Tiempo Total	Porcentaje [%]	Tiempo [hrs:mm:s]
Tiempo operativo	37.97%	3:06:11
Tiempo complementario	44.45%	3:37:56
Tiempo improductivo	17.58%	1:26:12

El tiempo operativo medido se considera adecuado para un proceso de barrenación horizontal con *jumbo* en el método de *Post-Pillar*. Por otra parte, el tiempo complementario es mayor que el operativo y esto indica que el proceso se puede agilizar reduciendo este tiempo.

Pero antes de plantear una reducción en el tiempo complementario, primero se debe reducir al máximo o eliminar el tiempo improductivo.

La información recabada indica que el tiempo improductivo dentro del proceso es aproximadamente del 20%. Para facilitar la identificación de las actividades que generan la mayor parte del tiempo improductivo se elaboró la Gráfica 13 donde se muestra el porcentaje parcial de cada una.



Gráfica 13 Distribución del tiempo improductivo  
Fuente: Unidad minera

Se observa que las actividades con mayor tiempo son las que se identificaron como actividades poco vitales en el gráfico de Pareto. Estas son:

- Falta de insumos
- Barra despuntada
- Negligencia del operador
- Problemas de servicio auxiliares

Para determinar el tipo de solución más adecuada, todas las actividades del tiempo improductivo se dividieron en tres categorías:

- Mantenimiento
- Administración
- Operación

A su vez se subdividen en los siguientes:

#### Mantenimiento

- Mantenimiento eléctrico
- Mantenimiento mecánico
- Mantenimiento hidráulico

#### Administración

- Reasignar prioridades
- Esperar órdenes
- Problemas con servicios auxiliares
- Falta de materiales para barrenación

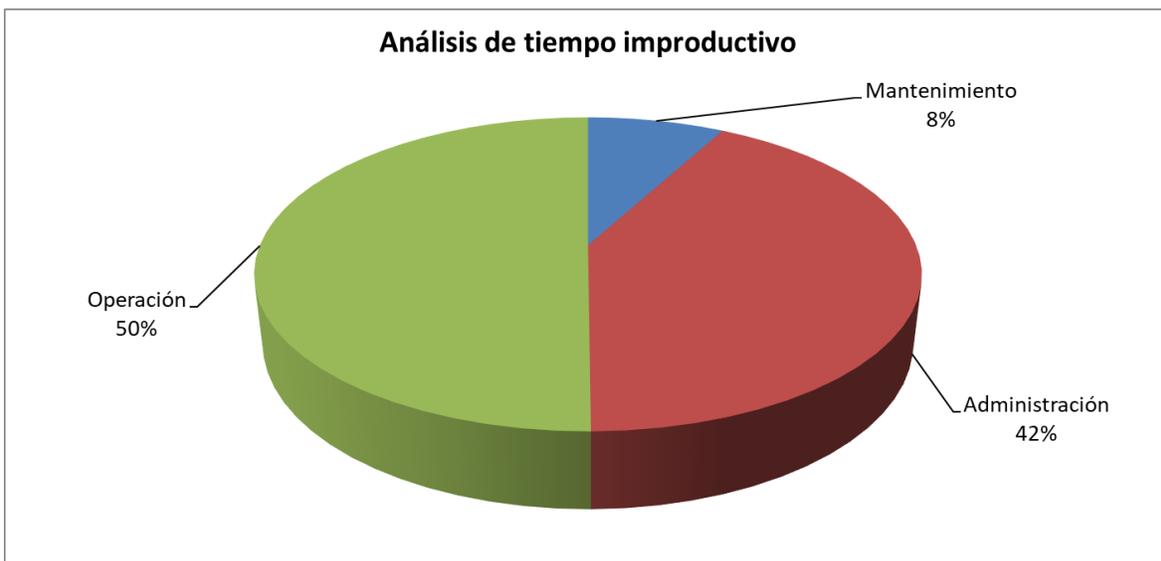
#### Operación

- Esperar rezagado de la frente
- Negligencia del operador
- Nivelar piso (LHD)
- Barra o extensión atascada
- Barra despuntada

Después de clasificar y subdividir las actividades, se elaboró la Tabla 14 y la Gráfica 14 para facilitar la visualización de los resultados.

Tabla 14 Distribución de tiempo improductivo  
Fuente: Unidad minera

Análisis de tiempo improductivo	Tiempo [hrs:mm:ss]	Total [%]
Mantenimiento	0:06:50	7.92%
Administración	0:36:10	41.96%
Operación	0:43:12	50.12%
<b>Total</b>	<b>1:26:12</b>	<b>100.00%</b>



Gráfica 14 Análisis de tiempo improductivo  
Fuente: Unidad minera

Con base en los resultados anteriores, se determina que el primer aspecto a solucionar dentro del proceso de barrenación es la parte operativa, ya que genera el 50% del tiempo improductivo.

El aspecto operativo del proceso tiene ineficiencia por las siguientes actividades:

- a) Barra despuntada
- b) Negligencia del operador
- c) Barra o extensión atascada
- d) Esperar rezagado de la frente
- e) Problema de servicios auxiliares
- f) Nivelar piso (LHD)

Las primeras tres problemáticas pueden solucionarse por medio de la simplificación del Procedimiento de Barrenación con *Jumbo* y capacitar a los operadores.

Los problemas restantes se solucionan mejorando la disciplina operativa, es decir, respetar el ciclo de minado y ejecutar de la mejor manera posible la planeación de explotación.

Por otra parte, el aspecto administrativo es afectado por:

- a. Reasignar prioridades
- b. Esperar órdenes
- c. Falta de materiales para barrenación

Para solucionar las problemáticas anteriores se recomienda analizar y comprobar el funcionamiento del proceso administrativo interno para la planeación y gestión del proceso de extracción.

La segunda medición realizada fue el consumo de acero de barrenación y el conjunto de datos de esta medición mostro ser un área de mejora dentro del proceso a corto plazo.

El alto consumo de acero afecta los costos de cuele de obra y las principales causas que el autor propone son:

- La saturación de trabajo hacia algunos operadores, provocando poca o nula calidad de las plantillas de barrenación.
- La deficiente disponibilidad de la maquinaria dentro de los rebajes 1 y 2. En el mes de abril se pidió prestado el *jumbo* #10 porque el *jumbo* #2 se encontraba en mantenimiento preventivo mientras el *jumbo* #5 se encontraba fuera de servicio por mantenimiento correctivo en la perforadora.

La saturación de trabajo se evita generando un rol de trabajo balanceado, en el cual el talento de todos los operadores de *jumbo* se aprovecha.

La poca disponibilidad de la maquinaria se debe principalmente a la mala rotación de las máquinas. En la Tabla 15 se muestra el conjunto de datos relacionado a la frecuencia de uso y los rendimientos del *jumbo* 2 y *jumbo* 5.

Tabla 15 Distribución del tiempo de barrenación por *jumbo*

Fuente: Unidad minera

Jumbo	Frecuencia	Bnos. Prom./día	TIEMPOS PROMEDIO POR JUMBO			
			Tiempo posicionamiento [min]	Tiempo barrenación efectivo [min]	Tiempo de limpieza barreno [min]	Tiempo total [min]
J-2	7	22	00:00:23	00:02:08	00:00:23	00:02:53
J-5	12	22	00:00:21	00:02:07	00:00:19	00:02:48
PROMEDIO			00:00:22	00:02:07	00:00:21	00:02:50

La Tabla 15 indica que ambos *jumbos* tienen rendimientos similares y no es un impedimento para rotarlos. Es decir, ambos tienen tiempos de barrenación promedio similares y los barrenos muestreados de cada uno tenían características similares.

En relación con la frecuencia de uso de los *jumbos*, se determinó el 63.16% para el *jumbo* 2 y 36.84% para el *jumbo* 5. Lo anterior sólo indica que la mala rotación de los equipos estaría afectando la disponibilidad de la maquinaria por un desgaste excesivo.

Lo anterior se puede solucionar si los supervisores de mina verifican que los operadores roten los *jumbos* para equilibrar el desgaste entre ambas máquinas.

La tercera y cuarta medición se analizan juntas porque se tiene una fuerte correlación entre el factor de carga utilizado y el avance lineal obtenido. Además, se tiene la hipótesis que aumentando el factor de carga se obtiene el avance de obra deseado.

Lo anterior se afirma porque en los avances de obra muestreados en el rebaje 2, se observa que no se genera la suficiente cara libre para el desborde después de la detonación de la cuña. Es decir, existe un apelmazamiento.

Por lo tanto, el aumento del factor de carga va a:

1. Disminuir el factor de disturbancia
2. Generar obras simétricas
3. Generar un perfil plano en la frente generada
4. Generar un perfil granulométrico adecuado (sin *sobretamaños*)
5. Producir avances de disparo mayores a 4.0 m

En conclusión, el factor de carga no sólo agilizará el proceso general sino también reducirá el costo de cuele de obra. En la etapa de mejora se profundiza este análisis.

## 4.1. Diagrama de Ishikawa

Las mediciones antes mencionadas se enfocan al proceso principal para la extracción del mineral, es decir, el proceso de barrenación y voladura. Para corroborar que se aborda la causa raíz del problema, se analiza el proceso de barrenación con un diagrama de espina de pescado.

En el anexo 3 se observa el diagrama de Ishikawa elaborado. De este, los principales problemas detectados son:

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| a) Barra despuntada              | f) Reasignar prioridades                |
| b) Negligencia del operador      | g) Esperar órdenes                      |
| c) Barra o extensión atascada    | h) Problema de servicios auxiliares     |
| d) Esperar rezagado de la frente | i) Falta de materiales para barrenación |
| e) Nivelar piso (LHD)            |   |

Analizando el diagrama de Ishikawa, se corrobora que los problemas antes mencionados son los responsables de la ineficiencia del proceso de barrenación. Las causantes de cada una de ellas se enlistan en la Tabla 16.

Tabla 16 Problemáticas del proceso de barrenación  
Fuente: Unidad minera

Problemática	Causa raíz
Barra despuntada	Mal emboquillado de los barrenos <ul style="list-style-type: none"> <li>No respetar las presiones de avance, rotación y percusión</li> </ul>
Negligencia del operador	Mal ambiente laboral <ul style="list-style-type: none"> <li>Descuido al realizar las tareas asignadas</li> <li>Mala actitud del personal</li> </ul> Deficiente comunicación entre personal <ul style="list-style-type: none"> <li>Esperar órdenes</li> <li>No comprender las actividades asignadas</li> </ul>
Barra o extensión despuntada	Mal emboquillado de los barrenos <ul style="list-style-type: none"> <li>No respetar las presiones de avance, rotación y percusión</li> </ul> <i>Jumbo</i> en mal estado <ul style="list-style-type: none"> <li>Negligencia de los operadores</li> <li>Programa de mantenimiento preventivo mal ejecutado</li> </ul>

Esperar rezagado de la frente	Flexibilidad de explotación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aligerar la responsabilidad del personal</li> </ul>
Nivelar piso (LHD)	Piso mal nivelado <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tepetate de relleno no balastreado</li> <li>• Falta de tiempo para nivelación de pisos</li> </ul>
Reasignar prioridades	Ineficiente ejecución de planeación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asignar tareas no previstas</li> <li>• Personal no capacitado</li> </ul>
Esperar ordenes	Deficiente comunicación entre personal <ul style="list-style-type: none"> <li>• Esperar órdenes</li> <li>• No comprender las actividades asignadas</li> </ul>
Problema de servicios auxiliares	Ineficiente ejecución de planeación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Asignar tareas no previstas</li> <li>• Personal no capacitado</li> </ul> Flexibilidad de explotación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aligerar la responsabilidad del personal</li> </ul>
Falta de materiales para barrenación	Escasez de acero de barrenación <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconocimiento del consumo de acero mensual</li> <li>• Mal suministro de acero a los operadores</li> </ul> Procedimiento complicado para reabastecimiento de materiales <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exceso de firmas</li> <li>• Falta de control en los egresos de materiales</li> </ul> Supervisión de mediciones <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se delimitan las responsabilidades entre el personal</li> <li>• Formatos complicados para supervisión</li> </ul>

## 4.2. Diagrama de la cadena de valor

El diagrama de la cadena de valor tiene como objetivo detectar los procesos principales del cuele de obra. Esto facilitará la supervisión y control del proceso.

Al analizar el diagrama del proceso, se pueden determinar las principales actividades para el cuele de los topes:

- Barrenación
- Cargado de explosivos y la voladura

El proceso de barrenación tiene gran influencia en el resultado de la voladura, es decir, el avance del disparo. El éxito de una voladura

depende principalmente de una adecuada plantilla de barrenación (barrenos con paralelismo, profundidad homogénea y libres de agua y detritos).

Por otra parte, en la voladura se debe utilizar el factor de carga adecuado y tener una disciplina operativa durante el cargado. Es decir, utilizar la cantidad y tipo de explosivo indicado, cebar correctamente los explosivos, taponear todos los barrenos y respetar la secuencia de detonación.

En conclusión, el proceso de barrenación es clave para el cuele de topes de desarrollo y el rendimiento de la voladura dependerá ampliamente de este. Por lo tanto, debe estar controlado y supervisado correctamente.

En la figura 16 se muestra el Diagrama de la cadena de valor con sus respectivas actividades.



Fig. 16 Diagrama de la cadena de valor  
Fuente: Unidad minera

## 5. Propuesta de mejora

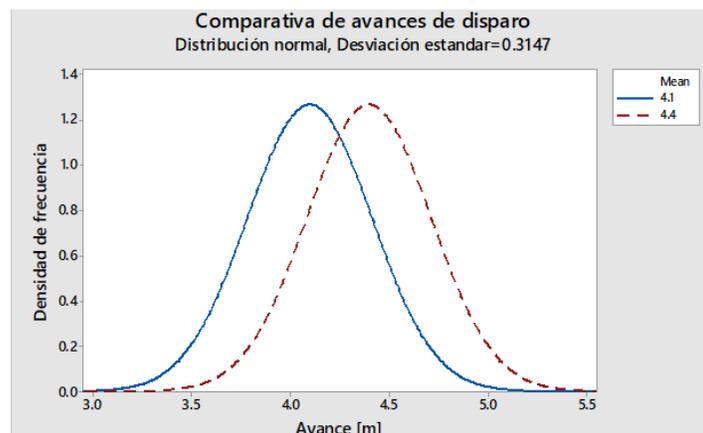
Para agilizar el proceso de extracción de mineral se propone aumentar entre un 10% y 25% los avances de disparo en los topes de desarrollo y uniformizar el rendimiento de los operadores.

Para lograr la primera propuesta se propone aumentar el factor de carga para buscar alcanzar el estado óptimo de la voladura. Este último maximizará la producción, fragmentación y seguridad; además se minimiza la dilución, el costo de excavación y el impacto ambiental<sup>26</sup>.

Para aumentar el avance de disparo y desplazar la distribución normal hacia la derecha teniendo como media 4.4 m, límite inferior 4.0 m y límite superior 4.8 m; se aumentará el factor de carga a  $39 \frac{kg}{m.l.}$ , siendo de  $36 \frac{kg}{m.l.}$  el actual.

Este aumento se propone porque el factor de carga de  $39 \frac{kg}{m.l.}$  se ha empleado en algunos topes del rebaje 2 y se ha observado mejor acabado de obra, disminución en la fortificación de obras y mejor geometría por parte de los operadores de *jumbo* y oficiales de voladura.

En la Gráfica 15 se muestra el desplazamiento esperado de la curva normal de los avances de disparo con el aumento del factor de carga. Por lo tanto, esto implica que los avances de disparo sean mayores a 4 m.



Gráfica 15 Comparativa de distribuciones normales  
Fuente: Unidad minera

<sup>26</sup> Sushil Bhadari (1997), *Engineering Rock Blasting Operations*.

Otro factor por considerar para proponer el aumento del explosivo es la presencia de *sobretamaños* ( $>9''$ ) en el perfil granulométrico. En la Figura 17 se observan fragmentos de roca superiores a  $9''$  que aumentan el desgaste de los *liners* y el riesgo de atascamiento en la quebradora primaria porque la granulometría mineral deseada es de  $6''$  a  $9''$ , de acuerdo con el procedimiento de operación de quebradora.



Fig. 17 Rezaga de frente del Rebaje 2  
Fuente: Unidad minera

El último factor por considerar es que el proveedor de explosivos recomienda aumentar el factor de carga cuando se presentan deficiencia en el avance de disparo en la voladura. Siempre y cuando la técnica de cargado por parte del personal sea la correcta y existan *sobretamaños* en el perfil granulométrico; en caso de no producirse una mejora en la eficiencia de disparo se recomienda modificar la plantilla de barrenación.

Por último, es importante recordar que las técnicas de voladura y diseño de voladuras en una mina son optimizadas en meses o años, hasta que se obtiene mayor conocimiento en las condiciones de la roca<sup>27</sup>.

El factor de carga pasa de  $36 \frac{kg}{m.l.}$  a  $39 \frac{kg}{m.l.}$  porque se aumenta a 76 el número de cartuchos de *Emulex*  $1\frac{1}{2}$ - $39''$ . Para hacer notar el cambio en la forma de cargado, en la Figura 18 se muestra la plantilla de barrenación utilizada, así como los cartuchos utilizados por barreno.

---

<sup>27</sup> Sushil Bhadari (1997), *Engineering Rock Blasting Operations*.

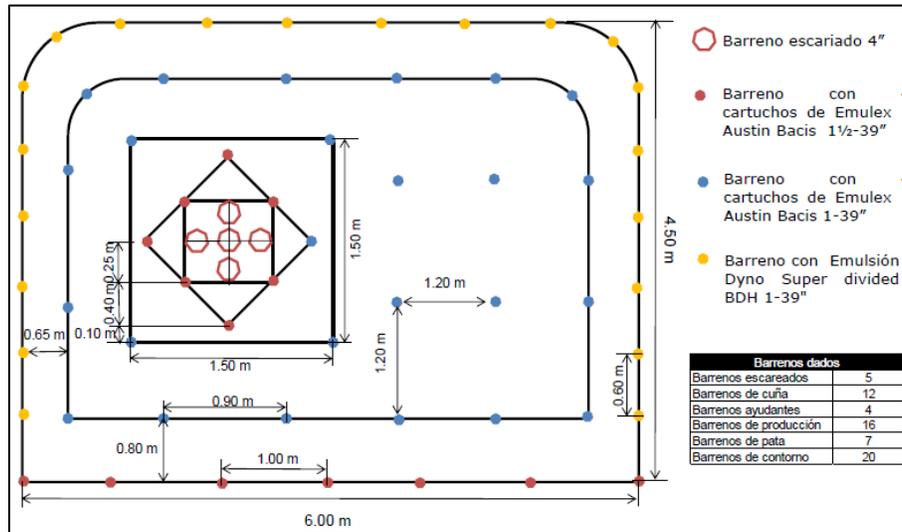


Fig. 18 Plantilla de barrenación de sección 6.00x4.50 m con forma de cargado actual  
Fuente: Unidad minera

Por otro lado, en la Figura 19 se observa la forma de cargado recomendada. Teóricamente este cambio generará la cara libre suficiente para producir un adecuado perfil granulométrico, evitar apelmazamientos y promover una adecuada detonación de todos los barrenos.

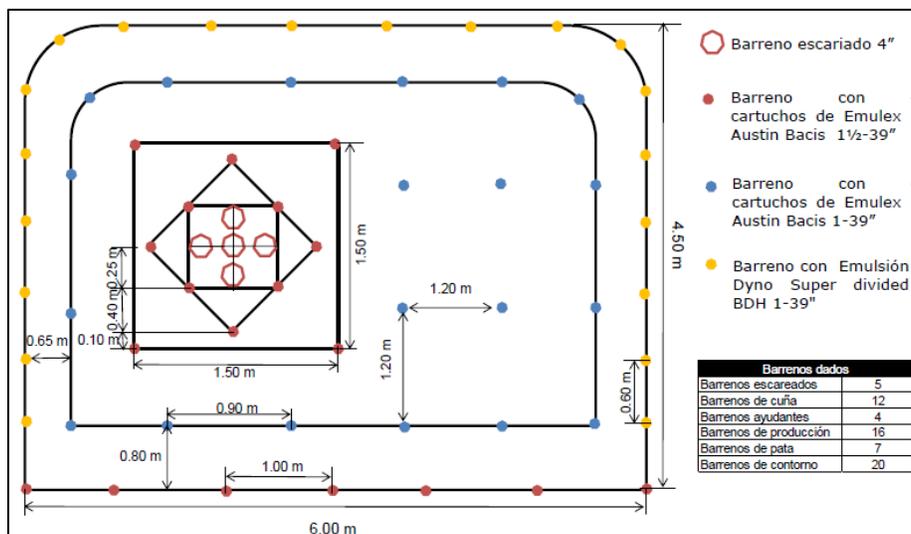


Fig. 19 Plantilla de barrenación de sección 6.00x4.50 m con forma de cargado propuesto  
Fuente: Unidad minera

Para uniformizar el rendimiento de los operadores se realiza una simplificación del procedimiento de barrenación con *jumbo* y del procedimiento de voladura con *Anfo loader*. Esto reduciría los costos y el tiempo del ciclo de operación.

En resumen, la metodología *LSS* se utilizó para realizar un análisis sistemático al proceso de barrenación y detectar las áreas de oportunidad para mejorar el proceso de extracción. Después del análisis y mejoras propuestas se concluyó:

- ✓ El tiempo operativo abarca el 37.97% del tiempo total del turno. Lo que hizo necesario identificar y eliminar las actividades operativas y administrativas que generan los tiempos muertos.

Con el diagrama de Ishikawa se identificó la causa raíz de cada actividad para su posterior eliminación. Con lo anterior se espera lograr agilizar el proceso.

Es importante aclarar que con ciclos cortos se espera una reducción en el costo de producción. Para cuantificar dicho beneficio es necesario realizar un análisis financiero.

- ✓ Al comparar el rendimiento de los operadores de jumbo y de los equipos de barrenación, se observa que no son impedimentos para que exista una gran variación en la cantidad de los topes barrenados por turno. Pero se recomienda mejorar el ambiente de trabajo para poder efectuar una gestión y supervisión efectiva dentro del proceso de excavación.
- ✓ El aumento del factor de carga es un punto clave para alcanzar la mejora del estado óptimo del proceso de barrenación y voladura. Si este llegará a funcionar el perfil de las obras sería geométrico y estable; por lo tanto, se disminuiría la dilución y los trabajos de amacice, así como los elementos de fortificación.
- ✓ En el diagrama de Ishikawa se observa que el primer problema operativo es el mal emboquillado en los barrenos. Esto ocasiona que no se realicen barrenos paralelos ni limpios y genera un mayor desgaste en la broca. Además, si las presiones de rotación, percusión y avance no se respetan se puede atascar la barra ocasionando el despunte de esta.
- ✓ En la unidad minera, se observó que los operadores no realizan el emboquillado de los barrenos. Por lo tanto, se recomienda simplificar el procedimiento de barrenación con *jumbo* para unificar el rendimiento de los operadores.

- ✓ La mala calidad de las secciones se considera el segundo problema operativo por afectar la seguridad y movilidad dentro de la mina. Además, estas aumentan el trabajo de amacice y genera retrabajos, como los *desbordes*. Para este problema hay varias hipótesis, se describen a continuación:

*"Cuando no se obtiene la sección de obra deseada porque se "quedan" los hombros o hay patas en la obra. Este problema se puede atribuir al factor de carga insuficiente porque sólo se proporcionan 56 piezas de alto explosivo 1½-39", lo cual impide cargar todos los barrenos de la cuña y no genere la suficiente cara libre. Por otra parte, se observó que el sobrante de explosivos de días anteriores se almacena erróneamente, afectado su rendimiento en la siguiente voladura. Por último, se identificó que los oficiales de voladura y ayudantes tienen una mala técnica de cargado por apelmazar los explosivos en lugar de acoplar. También, se observó que los estopines no se colocan correctamente.<sup>28</sup>"*

- ✓ Para las secciones que incumplen con las características establecidas se recomienda aumentar a 76 el número de piezas de alto explosivo 1½-39", simplificar el procedimiento de cargado y voladura y realizar pláticas de concientización hacia los oficiales de voladura sobre la importancia de una buena técnica de cargado.
- ✓ Los problemas administrativos suelen tener soluciones rápidas y de bajo capital de inversión. El desabasto de materiales se puede solucionar si se pre-autoriza una cantidad de acero con base en los registros de consumo de meses anteriores. Además, se aumentaría un 10% para cubrir un mejor rendimiento de barrenación o imprevistos.

---

<sup>28</sup> Testimonio personal observado en campo.

Lo anterior facilitará a los supervisores el suministro y control de materiales hacia los operadores. Además, las firmas que se solicitan en el proceso actual no serán excesivas.

## 5.1. Análisis financiero

El análisis financiero se realiza para cuantificar los beneficios económicos de la mejora propuesta y demostrar que esta recomendación brinda una reducción en los costos de voladura.

Antes de mostrar dicho análisis, es importante aclarar que el factor de carga de  $36 \frac{kg}{m.l.}$  es decisión de la gerencia de mina porque sólo autorizan utilizar 56 cartuchos del explosivo *Emulex 1* de 1½-39". Esto como una alternativa para reducir el costo de la voladura.

Sin embargo, dicha medida ha tenido poco éxito y por lo tanto se recomienda aumentar el factor de carga a  $39 \frac{kg}{m.l.}$  para mejorar los avances de disparo, el perfil granulométrico, el acabo de obra y reducir el costo de excavación.

El análisis financiero se realizó con las fórmulas para evaluar el costo de explosivos del capítulo V.- Cargado y voladura de la tesis "*Manual del supervisor de minas subterráneas en el caso de roca dura*" del Ing. Alejandro Cano Cabello de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

A continuación, se muestra el procedimiento empleado, pero si quiere profundizar más en el tema se recomienda consultar la tesis del Ing. Alejandro Cano Cabello.

En este trabajo en la Tabla 17 se muestran los datos referentes al explosivo empleado en el procedimiento actual de cargado.

Los datos utilizados para el cálculo son:

- Sección de obra  $5.00 \times 4.50 \text{ m}$
- Avance promedio por disparo  $4.10 \text{ m}$

Tabla 17 Factor de carga actual de tope de desarrollo de sección 5.00x4.50 m

Fuente: Unidad minera

Explosivo actual					
Artículo	Cartuchos	Nº barrenos	Explosivo/barreno	Total [kg]	Factor de carga [kg/m.l.]
Emulex 1 Austin Bacis 1" x 8"	0	0	0	147	36
Emulex 1 Austin Bacis 1-1/2" x 39"	56	14	4		
Emulex 1 Austin Bacis 1" x 39"	84	21	4		
Explosivo Enaex Softron 1-1/16" x 20"	0	0	0		
Emulsion Dyno Super dividida BDH 1" x 39"	20	20	1		
TOTAL		55			

Por otra parte, en la Tabla 18 se muestran los datos referentes a la forma propuesta de cargado.

Tabla 18 Factor de carga propuesto de tope de desarrollo de sección 5.00x4.50 m

Fuente: Unidad minera

Explosivo propuesto					
Artículo	Cartuchos	Nº barrenos	Explosivo/barreno	Total [kg]	Factor de carga [kg/m.l.]
Emulex 1 Austin Bacis 1" x 8"	0	0	0	162	39
Emulex 1 Austin Bacis 1-1/2" x 39"	76	19	4		
Emulex 1 Austin Bacis 1" x 39"	64	16	4		
Explosivo Enaex Softron 1-1/16" x 20"	0	0	0		
Emulsion Dyno Super dividida BDH 1" x 39"	20	20	1		
TOTAL		55			

Es importante aclarar que todos los precios mostrados en las tablas están en dólares y los costos mostrados en este trabajo son aproximados porque sólo se enfoca en los costos de barrenación y voladura.

En las Tablas 19 y 20 se muestra la razón por la que se aumenta el factor de carga de  $36 \frac{kg}{m.l.}$  a  $39 \frac{kg}{m.l.}$ . El único cambio que se propone es aumentar de 56 a 76 piezas de *Emulex 1 1½-39"* y disminuir de 84 a 64 piezas de *Emulex 1* de 1-39".

Tabla 19 Costos de voladura con forma de cargado actual

Fuente: Unidad minera

Tope de desarrollo (actual)		Costo artificios	\$2,001.55	Costo explosivos	\$4,505.92	TOTAL	\$6,507.47
Detonadores No-electricos	Artículo	Periodo	Cantidad	Precio unitario	Sub-total	Total	
	Exel LP Orca de 18 ft	1	1	\$32.12	\$32.12	\$1,702.44	
	Exel LP Orca de 18 ft	2	1	\$32.12	\$32.12		
	Exel LP Orca de 18 ft	3	1	\$32.12	\$32.12		
	Exel LP Orca de 18 ft	5	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orca de 18 ft	6	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orca de 18 ft	7	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orca de 18 ft	8	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orca de 18 ft	9	8	\$32.12	\$256.97		
	Exel LP Orca de 18 ft	10	6	\$32.12	\$192.73		
	Exel LP Orca de 18 ft	11	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orca de 18 ft	12	0	\$32.12	\$0.00		
	Exel LP Orca de 18 ft	13	10	\$32.12	\$321.21		
	Exel LP Orca de 18 ft	14	8	\$32.12	\$256.97		
	Exel LP Orca de 18 ft	15	7	\$32.12	\$224.85		
Artificios	Artículo	Cantidad	Precio unitario	Sub-total	Total		
	Cordón detonante Austin Bacis 5 PE	30.00	\$6.15	\$184.58	\$299.11		
Iniciador Orca mecha ensamblada 2 m	2.00	\$57.27	\$114.53				
Explosivos	Artículo	Cantidad total	Nº barrenos	Explosivo/barreno	Precio unitario [\$]	Sub-total	Total
	Emulex 1 Austin Bacis 1" x 8"	0	0	0	\$3.78	\$0.00	\$4,505.92
	Emulex 1 Austin Bacis 1-1/2" x 39"	56	14	4	\$48.75	\$2,730.00	
	Emulex 1 Austin Bacis 1" x 39"	84	21	4	\$16.83	\$1,413.72	
	Explosivo Enaex Softron 1-1/16" x 20"	0	0	0	\$14.61	\$0.00	
	Emulsion Dyno Super dividida BD 1" x 39"	20	20	1	\$18.11	\$362.20	
TOTAL		55					

Tabla 20 Costos de voladura con forma de cargado propuesto

Fuente: Unidad minera

Tope de desarrollo (propuesto)		Costo artificios	\$2,001.55	Costo explosivos	\$5,144.32	TOTAL	\$7,145.87
Detonadores No-electricos	Artículo	Periodo	Cantidad	Precio unitario	Sub-total	Total	
	Exel LP Orica de 18 ft	1	1	\$32.12	\$32.12	\$1,702.44	
	Exel LP Orica de 18 ft	2	1	\$32.12	\$32.12		
	Exel LP Orica de 18 ft	3	1	\$32.12	\$32.12		
	Exel LP Orica de 18 ft	4	1	\$32.12	\$32.12		
	Exel LP Orica de 18 ft	5	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orica de 18 ft	6	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orica de 18 ft	7	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orica de 18 ft	8	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orica de 18 ft	9	8	\$32.12	\$256.97		
	Exel LP Orica de 18 ft	10	6	\$32.12	\$192.73		
	Exel LP Orica de 18 ft	11	2	\$32.12	\$64.24		
	Exel LP Orica de 18 ft	12	0	\$32.12	\$0.00		
	Exel LP Orica de 18 ft	13	10	\$32.12	\$321.21		
	Exel LP Orica de 18 ft	14	8	\$32.12	\$256.97		
	Exel LP Orica de 18 ft	15	7	\$32.12	\$224.85		
Artificios	Artículo	Cantidad	Precio unitario	Sub-total	Total		
	Cordón detonante Austin Bacis 5 PE	30.00	6	\$ 184.58	\$299.11		
	Iniciador Orica mecha ensamblada 2 m	2.00	57	\$ 114.53			
Explosivos	Artículo	Cantidad total	Nº barrenos	Explosivo/barreno	Precio unitario (\$)	Sub-total	Total
	Emulex 1 Austin Bacis 1" x 8"	0	0	0	\$3.78	\$0.00	\$5,144.32
	Emulex 1 Austin Bacis 1-1/2" x 39"	76	19	4	\$48.75	\$3,705.00	
	Emulex 1 Austin Bacis 1" x 39"	64	16	4	\$16.83	\$1,077.12	
	Explosivo Enaex Softron 1-1/16" x 20"	0	0	0	\$14.61	\$0.00	
	Emulsion Dyno Super divided BD 1" x 39"	20	20	1	\$18.11	\$362.20	
	TOTAL						

En la Tabla 21 se muestra una comparativa entre los costos de barrenación y voladura. Lo importante a destacar en los costos de barrenación, es que disminuye el costo por metro lineal si se aumenta el avance real en cada tope. Es decir, si la mejora llegara a aumentar los metros lineales de avance real de 4.1 m a 4.4 m, el costo de barrenación disminuye \$95.25 por metro.

Por otro lado, el costo de voladura aumenta por los cartuchos de explosivo *Emulex 1 1 1/2-39"*. Pero si con este también se incrementa el avance lineal de 4.1 m a 4.4 m, el aumento en el costo de voladura sólo sería de \$26.02.

Tabla 21 Comparativa de los costos barrenación voladura

Fuente: Unidad minera

Costo barrenación	Actual	Recomendado
	\$5,724.47	\$5,724.47
Avance planeado [m.l.]	4.1	4.4
Costo unitario barrenación [m.l.]	\$1,396.21	\$1,301.02
Costo voladura	Actual	Recomendado
	\$7,160.67	\$7,799.07
Avance planeado [m.l.]	4.1	4.4
Costo unitario voladura [m.l.]	\$1,746.50	\$1,772.52

En la Tabla 22 se observa la comparativa de costo total de cuele de obra. Entonces, al analizar esta comparativa contemplando la reducción del costo de barrenación y el aumento del costo de voladura, se obtiene un ahorro total de \$69.19 por cada tope de desarrollo realizado.

Tabla 22 Comparativo de los costos total de tumba  
Fuente: Unidad minera

Costo Total [m.l.]	Actual	Recomendado
	\$3,142.72	\$3,073.53
Costo unitario barrenación [m.l.]	\$1,396.21	\$1,301.02
Costo unitario voladura [m.l.]	\$1,746.50	\$1,772.52

Se concluye que la mejora, sólo en los rebajes de la empresa minera, generaría un ahorro mensual de \$1,522.08. Pero a dicho ahorro se le suma la cantidad \$3,142.32 porque el presupuesto mensual de 90 metros lineales se alcanzaría con 21 disparos en lugar de los 22. Lo anterior genera un ahorro mensual total de \$4,664.40.

Sin embargo, el objetivo de reducir el costo de cuele de obra un 10% no se cumple al no alcanzar un ahorro total de \$6,454.41. Pero se logra una reducción del 7%, la cual es buena si consideramos que no sólo se obtiene un beneficio financiero sino también operativo.

Si la gerencia de la mina observa el beneficio financiero y operativo en los rebajes de la minera se tendrá la confianza necesaria para implementar esta mejora a los rebajes de los contratistas.

## 5.2. Simplificación de los procedimientos de trabajo

Además de aumentar el factor de carga por cada tope de desarrollo, se observó que el procedimiento de barrenación con *jumbo* y el procedimiento de voladura con *Anfo loader* no son lo suficientemente específicos y sencillos para capacitar al personal de nuevo ingreso ni para consultas rápidas.

Otro beneficio que se obtiene a través de la simplificación de los procedimientos es la disminución del tiempo necesario por ciclo de trabajo y uniformizar el rendimiento de los operadores. Lo anterior disminuirá o evitará la necesidad de pagar jornadas extras a los operadores de *jumbo* y oficiales de voladura para alcanzar las metas mensuales de producción y aumentaría la productividad.

Por lo tanto, el costo de operación presentará una disminución, pero no se puede cuantificar en este documento por no tener los datos precisos

del número de jornadas extras calendarizadas ni el número de trabajadores empleados para dichas jornadas.

En conclusión, este sería el primer paso para optimizar el recurso más valioso de cualquier empresa, es decir, el capital humano.

La simplificación propuesta busca facilitar el entendimiento de las tareas a desarrollar dentro del proceso de barrenación y voladura. Además, se recomienda agregar el diagrama del proceso de barrenación y voladura del Anexo 2 para explicar el impacto que tiene cada una de las etapas del cuele de obra.

En el Anexo 4 y 5 se muestran los procedimientos propuestos.

## 6. Control del proceso

La última etapa del modelo *DMAIC*, es controlar, en la cual se busca mantener las mejoras efectuadas y hacer que el estado mejorado del proceso sea permanente.

Se recomienda utilizar una tarjeta de barrenación y voladura para supervisar el proceso y realizar una recolección de mediciones sistematizada y ordenada.

Dicha tarjeta mejorará los canales de comunicación entre el operador del *jumbo*, el oficial de voladuras y el supervisor de mina. Lo anterior agilizará el proceso general.

En el anexo 6 se muestra dicha tarjeta de barrenación y voladura. A continuación, se explica su uso.

**Tarjeta de barrenación y voladura**

Nivel \_\_\_\_\_ Lugar \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_ Turno \_\_\_\_\_

<p><b>Barrenación</b></p> <p>Nombre: _____ Ficha: _____</p> <p>Nombre: _____ Ficha: _____</p> <p><b>Diseño de plantillas</b></p> <div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 100px; margin: 10px auto; border-radius: 10px;"></div>	<p><b>Voladura</b></p> <p>Nombre: _____ Ficha: _____</p> <p>Nombre: _____ Ficha: _____</p> <p><b>Datos de obra planeada</b></p> <p>Sección: _____ [m] Tipo de obra: _____</p> <p><b>Barrenación</b></p> <p>Tiempo de barrenación _____ Desgasta de broca _____</p> <p>Barrenos dados _____ Desgasta de barra _____</p> <p>Jumbo _____</p> <p>¿Cambio de broca? _____ ¿Cambio de barra? _____</p> <p>¿Por qué? _____ ¿Por qué? _____</p> <p><b>Voladura</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 70%;">Tipo de explosivo</th> <th style="width: 30%;">Piezas por barreno</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table> <p>Factor de carga: _____ [Kg/ ] Tiempo de cargado _____</p> <p><b>Resultado</b></p> <p>Avance planeado _____ [m] Eficiencia _____ [%]</p> <p>Avance real _____ [m]</p> <p style="text-align: center;">_____</p> <p style="text-align: center;">Firma Supervisor</p>	Tipo de explosivo	Piezas por barreno								
Tipo de explosivo	Piezas por barreno										

**Simbología**

<p><input type="radio"/> Barreno bueno</p> <p><input type="radio"/> Barreno corto</p> <p><input type="radio"/> Barreno tapado</p>	<p><input type="radio"/> Barreno comunicado</p> <p><input type="radio"/> Barreno sin limpiar</p> <p><input type="radio"/> Barreno quebrado</p>
---	--

Fig. 20 Tarjeta de barrenación y voladura

Fuente: Unidad minera

En el formato, el supervisor de mina especifica el lugar donde se van a desarrollar las actividades de barrenación y voladura, así como las cuadrillas que ejecutarán el trabajo.

Posteriormente el operador del *jumbo* llena las secciones de "Datos de obra" y "Diseño de plantilla".

Al término del proceso de barrenación, el operador de *jumbo* coloca los detalles de dicho proceso en la sección "Barrenación" y en caso de presentarse barrenos defectuosos se lo comunica al oficial de voladura y se especifica su ubicación en el diagrama de la plantilla de barrenación siguiendo la simbología de la figura 21.



Fig. 21 Simbología de barrenos  
Fuente: Unidad minera

Para el cargado del tope, la tarjeta se queda con el oficial de voladura quien utilizará el diagrama de la plantilla de barrenación como guía durante el cargado del tope y al finalizar colocará las mediciones de control de la voladura en la sección "Voladura" (*Ver figura 20*).

Después del cargado, el oficial de voladura entrega el formato al supervisor de mina para su revisión y comunicar cualquier detalle que considere relevante. Generalmente la voladura se realiza al turno siguiente al que se hizo la barrenación y cargado, por lo tanto, antes archivar el documento se coloca el resultado de la voladura en la sección "Resultado" por el supervisor (*Ver figura 20*).

Se recomienda utilizar este formato como un complemento al pueble de cada cuadrilla, el vale de explosivo y el vale de acero. Debido a que el formato mostrado anteriormente sólo será una ayuda para capacitar de manera práctica a los nuevos supervisores y podrá dejar de usarse cuando se considere que este haya adquirido la experiencia necesaria para realizar una supervisión efectiva.

## 6.1. Propuesta de formato para voladura

Es un formato de evaluación descriptiva observacional de la voladura. Dicha información ayudará a determinar los factores favorables y adversos que se tuvieron al momento de la barrenación y voladura permitiendo generar una planeación más precisa de las próximas frentes que tengan características geomecánicas similares.

Existen documentos para evaluar los resultados de la voladura. Pero este tiene la ventaja de sintetizar la información relevante. Por último, cabe aclarar que este formato sólo se recomienda utilizar cuando se presenta una deficiencia en los avances de disparo.

En el anexo 7 se muestra el formato "Histórico de voladura".

Dicho documento está dividido en dos secciones. En la primera de ellas se encuentra la información general de la obra y se complementa con las características geológicas y estructurales, así como los aspectos de la disciplina operativa que se cumplieron. (*Ver figura 23*)

Además, se esquematiza la plantilla de barrenación utilizada y se especifica el arreglo de los "noneles" así como el explosivo que se empleó.

La segunda sección se enfoca en el resultado de la voladura; la cual se divide en granulometría, acabado de obra y resultados de la obra. En la primera de ellas se describe la fragmentación; en la segunda se especifica el grado de simetría de la obra realizada y por último se mide el avance obtenido. (*Ver figura 23*)

La información recabada en este formato será la evidencia que determinará si la propuesta recomendada funciona y si este es el caso, medir el grado de la mejora obtenida con la implementación del proyecto *Lean Six Sigma*.

Por otra parte, si no se consiguen resultados favorables, dicha información servirá como base para los subsecuentes proyectos *LSS*.

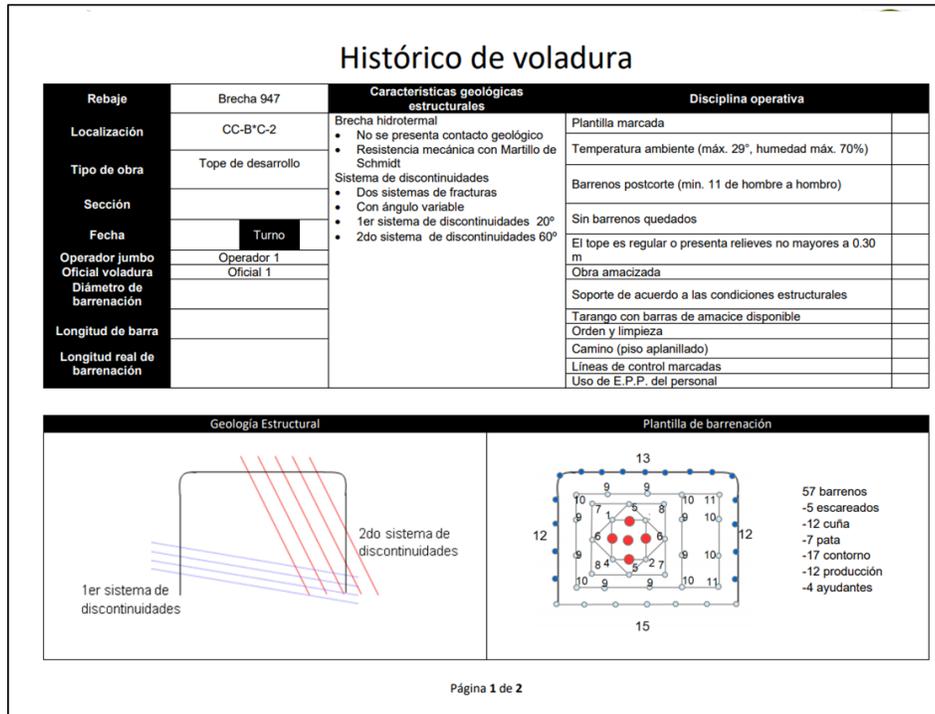


Fig. 22 Histórico de voladura 1  
Fuente: Unidad minera

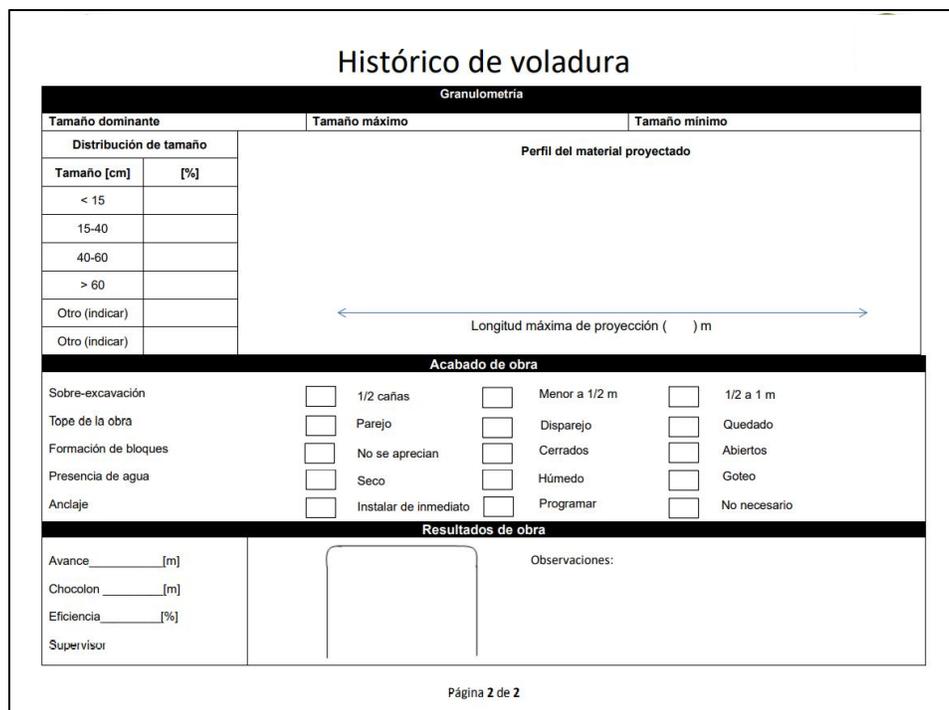


Fig. 23 Histórico de voladura página 2  
Fuente: Unidad minera

# Conclusiones

La metodología Lean Six Sigma puede ser un complemento perfecto para mejorar, controlar y supervisar los procesos de extracción de minerales. Pero sólo se deben utilizar las herramientas que el proceso en estudio requiera.

Además, se debe tener presente que Terra Vazant y Frenchetti<sup>29</sup> resaltan que el éxito de la mejora de un proceso está influenciado en gran medida por el apoyo, aprobación y convencimiento por parte de la alta dirección de la empresa.

Las herramientas LSS no se deben burocratizar porque sólo entorpecerán los procesos dentro de la mina y no tendrá el impacto esperado. Además, no se debe olvidar que generalmente la operación alcanzará su rendimiento óptimo después de varios proyectos LSS.

El presente proyecto se encontraba en la etapa de revisión, por lo cual no se tienen datos precisos para determinar si tuvo el éxito esperado. Pero con base en el análisis financiero, se determinó que se lograría una reducción del 7% (\$4,664.40 dólares mensuales) en los costos de cuele de obra en los rebajes de desarrollo. Pero si esta mejora funcionara se tendría un beneficio financiero y operativo.

Por otro lado, un beneficio de uniformizar el rendimiento de los operadores de jumbo y oficiales de voladura sería un proceso de extracción eficiente. Es decir, el presupuesto mensual de desarrollo (90 m) se cumpliría con 21 disparos porque los avances de disparo se mantendrían con una media de 4.4 m porque se disminuye el factor humano dentro del proceso por tener mano de obra capacitada.

Lo anterior se complementará con la simplificación de los procedimientos de los procesos para capacitar de manera eficiente al nuevo personal y cualquier persona los pueda comprender para facilitar la ejecución de las tareas asignadas.

Entonces, se espera que el consumo de acero disminuya con el empleo de mano de obra capacitada, roles de trabajo balanceados y una efectiva planeación y ejecución de los procesos administrativos para suministro de insumos.

---

<sup>29</sup> Ohino (1980), *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*.

Además, es importante mencionar que en el análisis de tiempos y movimientos se pudo observar que dentro del proceso de barrenación se tiene un tiempo improductivo (muerto) de 01:26:49 hrs. Lo cual es un aspecto por corregir a corto plazo para mejorar la eficiencia del proceso de barrenación.

Los documentos de control dentro de la minería existen y se utilizan con gran frecuencia. Pero en muchas ocasiones las herramientas de *LSS* ayudan a mejorar dichos formatos facilitando su implementación.

Por último, se debe destacar que la utilización de un marco de referencia facilita la implementación de esta metodología administrativa y estadística. Como su nombre lo dice, es una referencia y el éxito de la implementación dependerá en gran medida de las decisiones acertadas tomadas por el líder de proyecto, que debe estar familiarizado con la metodología al grado de ser Master Belt o Black Belt y tener amplios conocimientos y experiencia en la minería.

## Recomendaciones

Para llegar al rendimiento óptimo del proceso de barrenación en la unidad minera se debe disminuir el tiempo complementario. Lo anterior generará que el proceso sea más ágil y por consecuencia eficiente.

Como se observa en la Tabla 23, el tiempo complementario es mayor que el operativo. Entonces, el proceso funciona de una manera eficaz, pero se quiere que sea eficiente para optimizar recursos.

Tabla 223 Distribución del tiempo operativo  
Fuente: Unidad minera

Tiempo Total	Porcentaje [%]	Tiempo [hrs:mm:s]
Tiempo operativo	37.97%	3:06:11
Tiempo complementario	44.45%	3:37:56
Tiempo improductivo	17.58%	1:26:12

Entonces, se recomienda realizar un estudio de tiempos y movimientos enfocado en las actividades complementarias para determinar si todas las actividades que se contemplan en este tiempo son necesarias y cuantificar cuanto tiempo se puede reducir en cada una.

Además, sería recomendable capacitar a los supervisores, asesores y gerentes de mina con esta metodología. Con el fin de mostrarles herramientas administrativas que pueden emplear para mejorar y facilitar sus actividades diarias.

Lo anterior es posible porque es más fácil enseñarle a un experto en minería el enfoque administrativo y estadístico que utiliza la metodología, debido a que los ingenieros generalmente tienen formación fisicomatemática que les facilita entender los conceptos utilizados por *LSS*.

También, al ser expertos en los procesos de extracción y beneficio de minerales pueden evaluar hasta qué grado se debe burocratizar los procesos y evitar efectos negativos en las implementaciones de las mejores.

En conclusión, el mejor escenario para implementar *LSS* a la minería es a través de profesionistas experimentados en minería con un total dominio en la metodología *LM* y *SS*.

# Anexo 1

## Diagrama del proyecto

<b>Nombre del proyecto</b> Eficiencia de disparo en el rebaje 2	<b>Número del proyecto</b> <i>Por definir</i>
<b>Fecha</b> Mayo 2019	<b>Revisión</b> 0
<b>Objetivo</b>	
Aumentar entre un 10% y 25% la eficiencia de disparo en rebaje 2 en un lapso de 6 meses.	
<b>Objetivos secundarios</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mejorar el ambiente de trabajo</li> <li>Disminuir el consumo de acero</li> <li>Mejorar el manejo del explosivo</li> </ul>	
<b>A. Productos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Procedimiento simplificado de barrenación con <i>jumbo</i></li> <li>Procedimiento simplificado de voladura con <i>Anfo loader</i></li> <li>Tarjeta de monitoreo para barrenación y voladura</li> <li>Formato para evaluar la voladura</li> </ul>	
<b>B. Metas intermedias</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumentar la seguridad operativa en los rebajes</li> <li>Agilizar el proceso de producción por medio de la disminución de las tareas de amacice y fortificación</li> <li>Reducir 10% el costo de cuele de obra</li> </ul>	
<b>Cronograma de actividades</b>	
<b>Actividad</b>	<b>Duración [días]</b>
1. Solicitar los procedimientos operativos de barrenación horizontal con <i>jumbo</i> y voladura con <i>Anfo loader</i>	1
2. Conocer los procesos de barrenación horizontal con <i>jumbo</i> y voladura con <i>Anfo loader</i>	10
3. Realizar diagrama del proceso de barrenación con <i>jumbo</i> y voladura	3
4. Definir el proyecto <i>Lean Six Sigma</i>	1
5. Determinar el equipo <i>Lean Six Sigma</i>	1
6. Recolección de datos	10
7. Analizar los datos recolectados	5
8. Determinar las causas principales que ocasionan la deficiencia de disparo	1
9. Realizar una lluvia de ideas para encontrar las soluciones de las causas de los problemas de los procesos de barrenación con <i>jumbo</i> y voladura	1
10. Determinar y aplicar las mejoras	15
11. Documentar los resultados obtenidos al aplicar las mejoras.	15
<b>Suposiciones, restricciones y dependencias</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>La gerencia de la mina está convencida de la necesidad del cambio y confía en el Proyecto <i>Lean Six Sigma</i></li> </ul>	

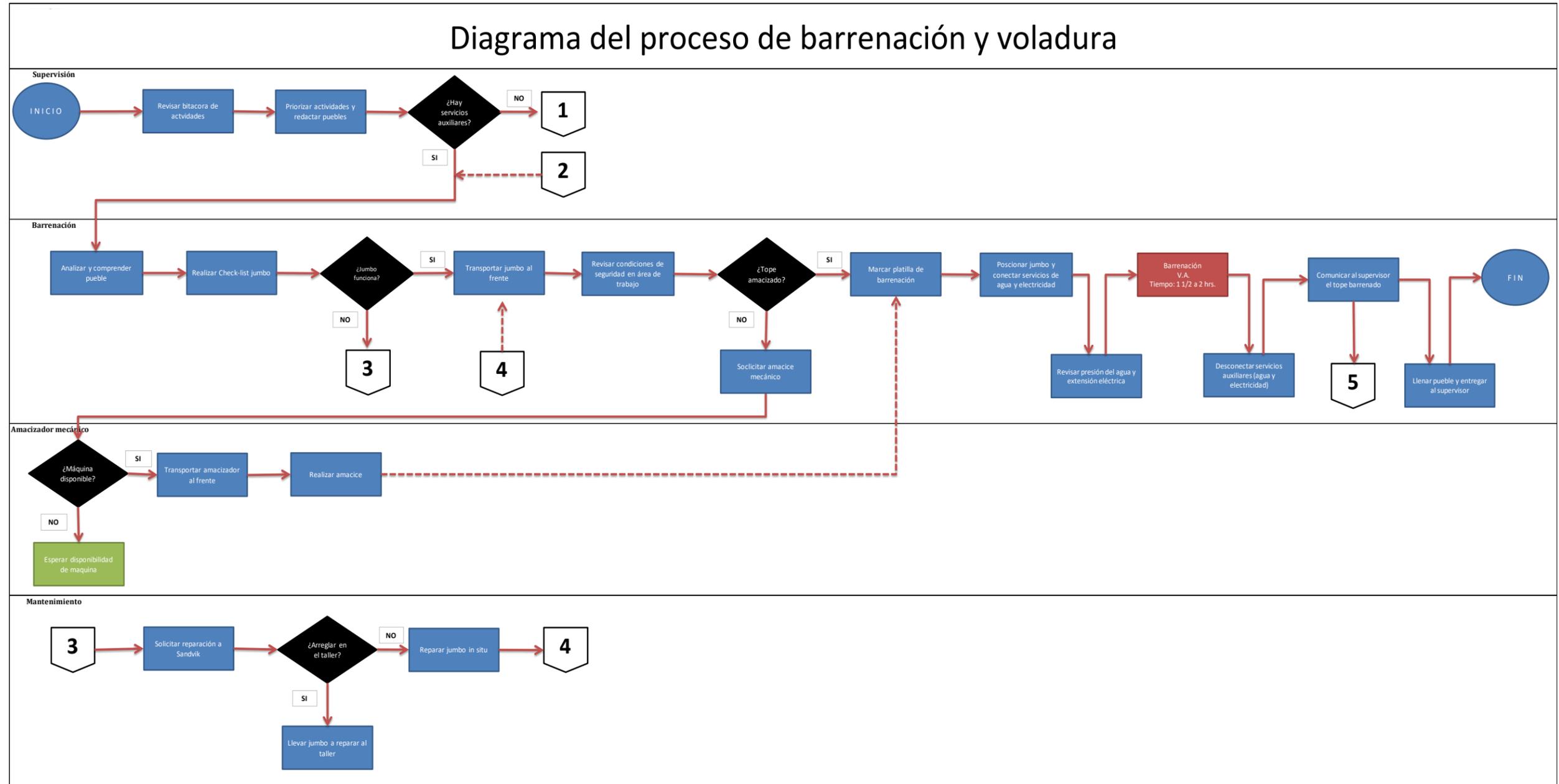
- Al implementar la *Mejora Lean Six Sigma* la esencia del proceso queda intacta
- El presupuesto mensual de desarrollo es una meta alcanzable
- La ley mineral de cabeza de los rebajes se encuentra entre los límites de control establecidos (0.9 a  $1.4 \frac{g\ Cu}{ton}$ )
- Las plantillas de barrenación son las adecuadas para las condiciones geomecánicas presentes en la mina
- El explosivo empleado cumple con las especificaciones técnicas proporcionadas por el proveedor *Austin Powder* y tiene adecuado desempeño en el rebaje 2
- Existe una disponibilidad mínima de maquinaria del 85%

**Documentos solicitados**

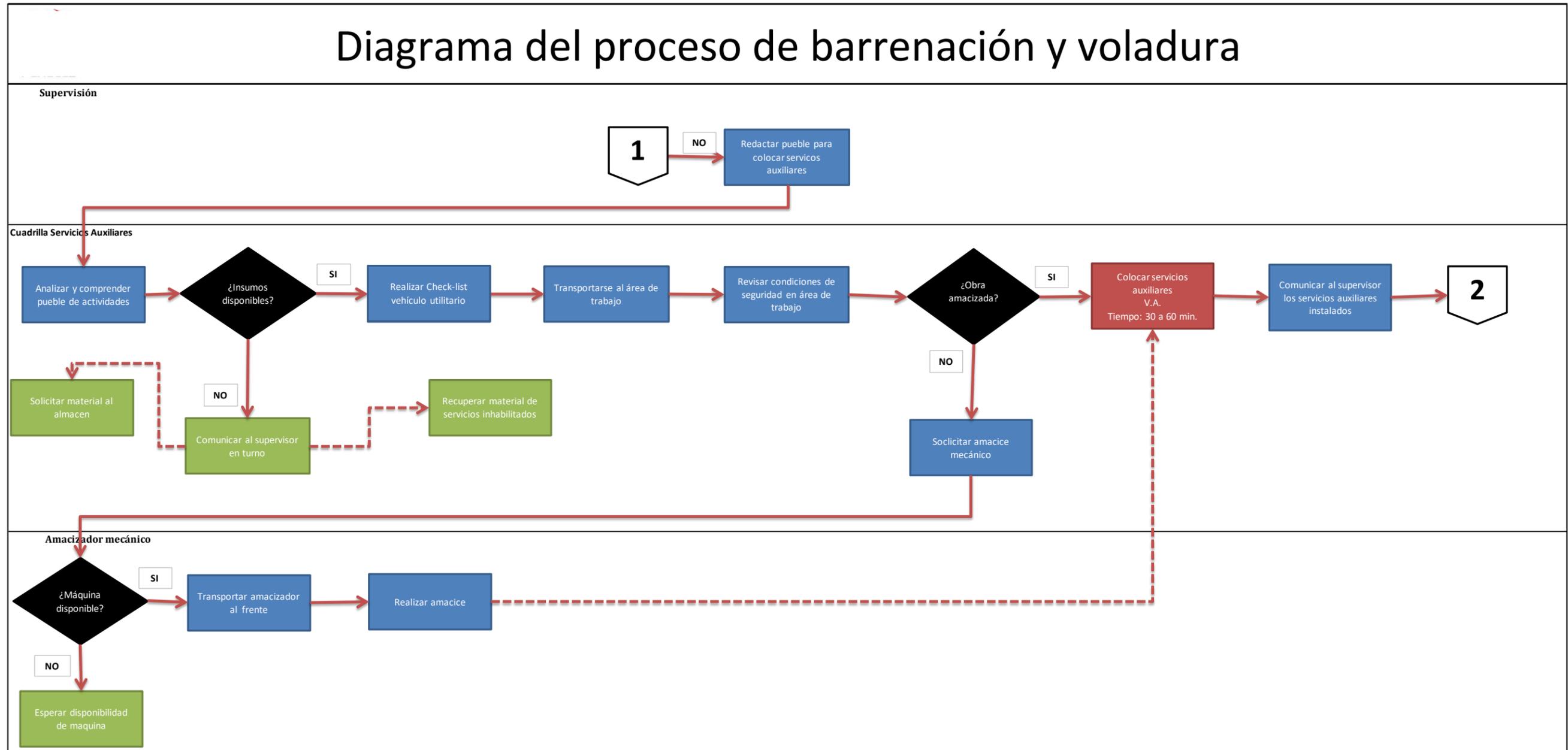
- Pueblo de barrenación
- Pueblo de voladura
- Vale de acero
- Vale de explosivo
- Cuadro de control de avances de disparo en los topes de desarrollo del rebaje 2
- Documento de costos operativos
- Procedimiento de barrenación con *jumbo*
- Procedimiento de voladura con *Anfo loader*
- Procedimiento de operación de quebradora

## Anexo 2

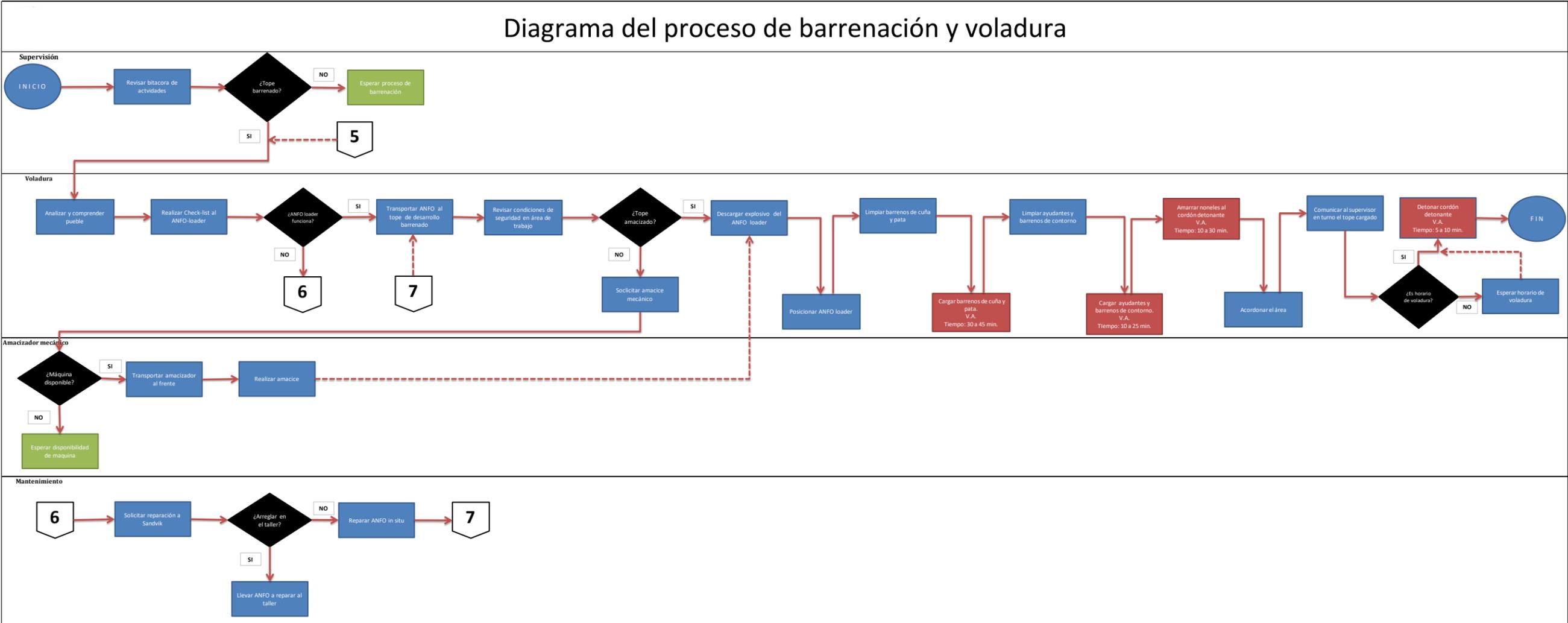
### Diagrama del proceso de barrenación y voladura



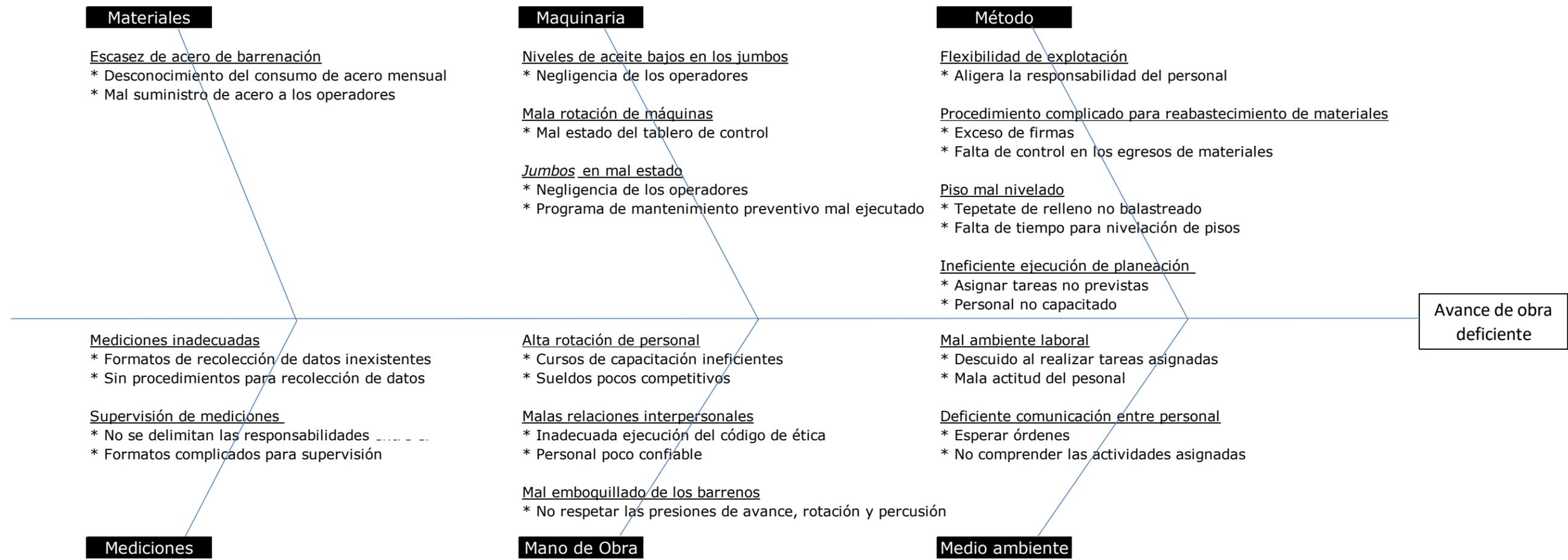
# Diagrama del proceso de barrenación y voladura



### Diagrama del proceso de barrenación y voladura



## Anexo 3 Diagrama de Ishikawa



## Anexo 4

### Procedimiento Barrenación con *Jumbo*

El operador del *jumbo* y el ayudante debe contar con el equipo de protección personal completo y en buen estado.

1. Antes de iniciar la barrenación se debe realizar el check-list del equipo.
  - a. Se realiza una inspección visual de la tornillería de la pluma, estado de las mangueras, funcionamiento de los paros de emergencia y niveles del aceite hidráulico
2. El operador del *jumbo* y el ayudante realizan una inspección visual de la frente a barrenar. Debe ser antes de ingresar a la zona y el *jumbo* debe estar alejado mínimo 30 *m* del tope o banco a barrenar.
  - a. Realizar una inspección visual de 50 *m* atrás del tope o banco a barrenar
  - b. Realizar amacice manual a rocas sueltas a una altura no mayor de 3.5 *m* en una trayectoria de afuera hacia dentro
  - c. De ser necesario, solicitar amacice mecanizado
  - d. Al no tener condiciones adecuadas en el piso, se recomienda solicitar nivelación
  - e. Verificar que no haya barrenos quedados, en caso contrario, retirar el explosivo y lavar los barrenos
3. Se realiza el marcaje de las cotas auxiliares y de la plantilla de barrenación
  - a. Ninguna obra debe ser realizada sin los trabajos topográficos (rumbos y pisos)
  - b. Se debe contar con rumbos y pisos cercanos al tope o banco a barrenar (distancia no mayor a 15 *m*)
  - c. Teniendo marcado los rumbos, se proyecta al piso con un láser de alta intensidad y se marcan con pintura en aerosol. Posteriormente se proyecta el centro de obra
  - d. Se procede al marcaje de la plantilla de barrenación propuesta

#### **Para bancos de producción:**

- ✓ El marcaje de la plantilla debe ser apoyado por el supervisor de mina y respetar el diseño propuesto (espaciamiento y bordo)
- ✓ En caso de no contar con una cara libre, el frente debe ser barrenado como un tope de desarrollo
- ✓ La secuencia de barrenación es de arriba hacia abajo. 1º barrenos de cielo; 2º barrenos de producción; 3º barrenos de tabla (de hombros a piso)

#### **Para topes de desarrollo:**

- ✓ La cuña debe ser marcada donde la frente se encuentre con menor

- presencia de estructuras geológicas (discontinuidades, fallas, diaclasas, fracturas). Teniendo una distancia prudente a las tablas y el cielo para no dañar la sección de la obra
- ✓ La secuencia de barrenación en los topes de desarrollo es: 1º barrenos de piso; 2º barrenos de cuña; 3º barrenos del primer cuadro; 4º barreno del segundo y tercer cuadro; 5º barrenos de producción; 6º barrenos de tabla; 7º barrenos de cielo
4. Colocar barricada visual y física
    - a. Colocar bengalas a una altura de 2 m y la lona a 1.50 m aproximadamente
  5. Para el posicionamiento del *jumbo*, se deben tener los servicios de electricidad y agua cerca. Distancia máxima de 350 m para el nicho eléctrico y de 60 m para la tubería de agua.
    - a. Realizar una inspección visual de la extensión eléctrica antes de energizar
    - b. La extensión eléctrica del *jumbo* se desenrolla conforme avanza el *jumbo* hacia el tope o banco. Se amarra la extensión con piola a las anclas de las tablas
    - c. Checar que la tubería de agua y la válvula de esfera de 2" se encuentren en buen estado para tener la presión de agua correcta (6-7 bar)
    - d. Se desenrolla la manguera de hule del *jumbo*. Se debe tener un tramo adecuado que permita al ayudante ir desenrollado más tramo de manguera si es necesario
    - e. Estando en posición el *jumbo* se conecta la manguera a la toma de agua. En caso de que la tubería tenga aire, se recomienda purgar la tubería y posteriormente conectar la manguera a la válvula. Se recomienda checar el sentido de la cuerda de la tuerca para evitar desgaste prematuro de las conexiones
    - f. El *jumbo* debe estar colocado al centro de la obra para permitir al brazo de perforación alcanzar todos los lugares a barrenar
    - g. Antes de iniciar la barrenación es necesario bajar los gatos hidráulicos para nivelar *jumbo*
  6. Para iniciar el proceso de barrenación, se asienta correctamente la pluma en la frente de obra para evitar el despunte de barras y asegurar el paralelismo de los barrenos
    - a. De no poder colocar la pluma sobre la frente a barrenar se recomienda tener el menor espacio posible entre la pluma y la frente a barrenar e ir recorriendo la viga de apoyo
    - b. No se debe cambiar de posición la pluma mientras se barrena
    - c. Se recomienda barrenar de arriba hacia abajo y de derecha a izquierda
    - d. Se recomienda emboquillar los barrenos entre 10 y 15 cm
      - i. Las presiones empleadas para el emboquillado son: Rotación 40-50 bar; Percusión 90-150 bar; Avance 30-60 bar

- ii. Las presiones para el resto del barrenado son: Rotación 50-60 *bar*;  
Percusión 150 *bar*; Avance 50-60 *bar*  
NOTA: Las percusiones pueden variar
- 7. Para el cambio de broca, se recomienda retroceder el *jumbo* a una sección de obra segura. Donde no existan rocas sueltas y se encuentre el anclaje en correctas condiciones
- 8. Al término del proceso de barrenación, se debe de colocar en "OFF" la cuchilla del centinela y se desconecta la extensión eléctrica
- 9. La extensión se enrolla en el carrete del *jumbo*
  - a. Se debe cuidar que la extensión no forme nudos en el carrete
- 10. Se cierra la válvula de agua, se desconecta la manguera y se enrolla en el carrete
- 11. La barricada y bengalas se retiran hasta que el *jumbo* haya salido de la sección barrenada
- 12. Se reporta al supervisor en turno la ubicación de la frente barrenada

## Anexo 5

### Procedimiento Voladura con *Anfo loader*

1. El oficial de voladura y el ayudante debe contar con el equipo de protección personal completo y en buen estado
2. El oficial de voladura y el ayudante deben realizar un levantamiento de la plantilla de barrenación que se va a cargar
3. Realizar el diagrama representativo de la plantilla de barrenación, indicando día de cargado, ubicación del tope o banco de producción, cantidad de barrenos cargados, la cantidad de explosivo total y por cada barreno. También se debe colocar la secuencia de disparo y la cantidad de "noneles" a utilizar con su respectivo retardo
4. El oficial de voladura en conjunto con el ayudante y supervisor de mina deben checar el diagrama de la plantilla propuesta, secuencia de disparo y la cantidad de explosivos y artificios solicitados
  - a. En caso de tener explosivo sobrante en el polvorín de paso, emplearlo lo antes posible o sino regresarlo al polvorín general
5. El oficial de voladura al tener el vale de explosivo verificado y firmado por el asesor responsable del área debe ir por el explosivo al polvorín
  - a. Realizar check-list a la polvorera
  - b. Se recomienda ir por el explosivo mínimo una hora antes del cargado
  - c. Iniciar el cargado de la frente antes de las 14:00 hrs.
  - d. Se debe amarrar los fulminantes con una liga para evitar una detonación por fricción
  - e. Durante el transporte respetar la compatibilidad de explosivos y artificios en todo momento
6. El oficial de voladura y el supervisor de mina deberán ir a checar las condiciones del área de cargado después de que el operador del *jumbo* haya informado haber concluido la barrenación
  - a. Realizar una inspección visual de 50 *m* atrás del tope o banco barrenado
  - b. Realizar amacice manual a rocas sueltas a una altura no mayor de 3.5 *m* de afuera hacia dentro
    - i. De ser necesario, solicitar amacice mecanizado
7. Colocar barricada visual y física en el área de cargado
  - a. Colocar dos bengalas a una altura de 2 *m* y una lona a 1.50 *m* aproximadamente
8. Posicionar el *Anfo-loader* al centro de la sección de obra y

aproximadamente a 2 m del frente

9. Para la nivelación de la canastilla se deben bajar los gatos hidráulicos delanteros y traseros
  - a. El tablero del sistema hidráulicos del *Anfo-loader*, se coloca el interruptor en "ON" para activar el funcionamiento de la canastilla
10. Colocar el explosivo sobre una tarima de madera. La cual se colocará preferentemente enfrente del tope o banco a barrenar y después del *Anfo-loader*, en un lugar seco y en una sección de obra anclada y en buenas condiciones
  - a. Los artificios serán colocados en una caja de madera dentro de la canastilla
11. Antes de iniciar el cargado se debe de corroborar que los barrenos se encuentren limpios y sin presencia de agua
  - a. En caso de tener detritos, se utilizará la cucharilla para limpiar los barrenos
  - b. En caso de presencia de agua, drenar la mayor cantidad de agua posible. De considerar necesario, *acordonar* la carga de fondo y columna de carga.
12. El cargado del tope o banco se debe iniciar de arriba hacia abajo.
  - a. 1º barreos de cielo; 2º barrenos de cuña (primer y segundo cuadro); 3º barrenos de producción y tabla; 4º barrenos de pata
    - i. Los barrenos de cuña y pata se cargan con Emulex de 1½-39"
    - ii. Los barrenos de producción se cargan con Emulex de 1-39"
    - iii. Los barrenos de contorno se cargan con Softron o Dyno de 1-39"
13. Para el cargado de los barrenos, el explosivo de fondo se ceba con el punzón de aluminio, plástico o madera.
  - a. Cuidar que el fulminante se encuentre paralelo al eje longitudinal del explosivo y en el primer tercio del barreno
  - b. Ingresar el explosivo y empujarlo hasta el fondo con el tubo antiestático. No se debe apelmazar la carga
  - c. La parte contraria del explosivo, a la que colocó el fulminante, se "achata" para acoplar los explosivos restantes.
14. Se ingresan los explosivos subsecuentes al barreno
  - a. Los explosivos intermedios se deben achatar de un extremo y se ingresa al barreno
  - b. El último explosivo del barreno se dobla en forma de "C" en un extremo y se ingresa el barreno. Se empuja con el tubo antiestático y se acopla cuidadosamente para evitar apelmazar los explosivos
  - c. La cañuela del fulminante se jala suavemente para comprobar que la carga ha quedado acoplada
  - d. Se taponean los barrenos con cartón. El tapón no debe sobrepasar los 0.70 m

- e. En los barrenos de contorno; si se utiliza Softron cada explosivo debe contar con su cople. Además, se debe utilizar un explosivo *Emulex 1-8"* como carga de fondo y los barrenos se deben taponear con un cartón de aproximadamente 0.70 m. En caso de usar DYN0, se ceba un extremo del explosivo y el otro se dobla en forma de "C"; se ingresa y se introduce de manera cuidadosa para evitar cortar las grapas
15. Al finalizar el cargado de los barrenos, se conectan los conectores de los "noneles" a la cañuela de arriba hacia abajo.
- a. Los ganchos de los "noneles" se conectan a la cañuela
  - b. Evitar formar aristas y respetar la forma de amarrado establecida
  - c. Se debe tensar correctamente la cañuela para evitar cortar la secuencia de detonación
16. Se debe acordonar el área y dejar los cordones detonantes cerca de la frente para amarrar 30 min antes de la detonación
- a. Se recomienda acordonar 10 m hacia atrás de la frente cargada con cinta roja de precaución a una altura de 1.50 m

# Anexo 6

## Tarjeta de barrenación y voladura

### Tarjeta de barrenación y voladura

Nivel \_\_\_\_\_ Lugar \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_ Turno \_\_\_\_\_

Barrenación  
 Nombre: \_\_\_\_\_ Ficha: \_\_\_\_\_  
 Nombre: \_\_\_\_\_ Ficha: \_\_\_\_\_

Voladura  
 Nombre: \_\_\_\_\_ Ficha: \_\_\_\_\_  
 Nombre: \_\_\_\_\_ Ficha: \_\_\_\_\_

**Diseño de plantillas**  
 Sección: \_\_\_\_\_ [m] Tipo de obra: \_\_\_\_\_

**Barrenación**  
 Tiempo de barrenación \_\_\_\_\_ Desgasta de broca \_\_\_\_\_  
 Barrenos dados \_\_\_\_\_ Desgaste de barra \_\_\_\_\_  
 Jumbo \_\_\_\_\_  
 ¿Cambio de broca? \_\_\_\_\_ ¿Cambio de barra? \_\_\_\_\_  
 ¿Por qué? \_\_\_\_\_ ¿Por qué? \_\_\_\_\_

**Voladura**

Tipo de explosivo	Piezas por barreno

Factor de carga: \_\_\_\_\_ [Kg/ ] Tiempo de cargado \_\_\_\_\_

**Simbología**

-  Barreno bueno
-  Barreno corto
-  Barreno tapado
-  Barreno comunicado
-  Barreno sin limpiar
-  Barreno quebrado

**Resultado**  
 Avance planeado \_\_\_\_\_ [m] Eficiencia \_\_\_\_\_ [%]  
 Avance real \_\_\_\_\_ [m]

\_\_\_\_\_  
 Firma Supervisor

# Anexo 7

## Histórico de voladura

Rebaje		Características geológicas estructurales		Disciplina operativa	
Localización	Brecha 947 CC-B*C-2	Brecha hidrotermal		Plantilla marcada	
Tipo de obra	Tope de desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> <li>No se presenta contacto geológico</li> <li>Resistencia mecánica con Martillo de Schmidt</li> </ul>		Temperatura ambiente (máx. 29°, humedad máx. 70%)	
Sección		Sistema de discontinuidades		Barrenos postcorte (min. 11 de hombre a hombro)	
Fecha	Turno	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos sistemas de fracturas</li> <li>Con ángulo variable</li> <li>1er sistema de discontinuidades 20°</li> <li>2do sistema de discontinuidades 60°</li> </ul>		Sin barrenos quedados	
Operador Jumbo	Operador 1			El tope es regular o presenta relieves no mayores a 0.30 m	
Oficial voladura	Oficial 1			Obra amacizada	
Díámetro de barrenación				Soporte de acuerdo a las condiciones estructurales	
Longitud de barra				Tarango con barras de amacice disponible	
Longitud real de barrenación				Orden y limpieza	
				Camino (piso aplanillado)	
				Líneas de control marcadas	
				Uso de E. P. del personal	

Geología Estructural		Plantilla de barrenación	
<p>1er sistema de discontinuidades</p> <p>2do sistema de discontinuidades</p>		<p>57 barrenos</p> <p>-5 escapeados</p> <p>-12 cuña</p> <p>-7 pata</p> <p>-17 contorno</p> <p>-12 producción</p> <p>-4 ayudantes</p>	

# Histórico de voladura

Tamaño dominante		Granulometría	
		Tamaño máximo	Tamaño mínimo
Perfil del material proyectado			
Distribución de tamaño			
Tamaño [cm]	[%]		
< 15			
15-40			
40-60			
> 60			
Otro (indicar)			
Otro (indicar)			
		Longitud máxima de proyección ( ) m	
<b>Acabado de obra</b>			
Sobre-excavación	<input type="checkbox"/>	1/2 cañas	<input type="checkbox"/>
Topo de la obra	<input type="checkbox"/>	Parejo	<input type="checkbox"/>
Formación de bloques	<input type="checkbox"/>	No se aprecian	<input type="checkbox"/>
Presencia de agua	<input type="checkbox"/>	Seco	<input type="checkbox"/>
Anciaje	<input type="checkbox"/>	Instalar de inmediato	<input type="checkbox"/>
		Menor a 1/2 m	<input type="checkbox"/>
		Disparejo	<input type="checkbox"/>
		Cerrados	<input type="checkbox"/>
		Húmedo	<input type="checkbox"/>
		Programar	<input type="checkbox"/>
		1/2 a 1 m	<input type="checkbox"/>
		Quedado	<input type="checkbox"/>
		Abiertos	<input type="checkbox"/>
		Goteo	<input type="checkbox"/>
		No necesario	<input type="checkbox"/>
<b>Resultados de obra</b>			
Avance	_____ [m]	Observaciones:	
Chocolon	_____ [m]		
Eficiencia	_____ [%]		
Supervisor			

# Referencias

## Libros

Terra Vanzant, S. (2016) *Lean Six Sigma International Standard and Global Guidelines*. EE. UU.: CRC Press Taylor & Francis Group. pp: 47-61, 137-140.

Franchetti, M. (2015) *Lean Six Sigma for engineers and managers with applied Case Studies*. EE. UU.: CRC PRESS Taylor & Francis Group. pp: 31-34.

Besterfield, D. (2009) *Control de calidad*. México: Pearson Educación. pp: 117-165

Löow, J. (2015) *Lean Production in Mining*. Scandinavia: Division of Human Work Science of University of Technology Luleå. pp: 55-61.

## Tesis

Cano, A. (2010) *Manual del supervisor de minas subterráneas en el caso de roca dura*. Tesis de licenciatura no publicada, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México.

## Artículos

Seifullina, Ahment Er, Peter, Garza-Reyes, Kumar, V. (2018), *A Lean Implementation Framework for the Mining Industry*. En M. Macchi, L. Monostori y R. Pinto ("Ed."), 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018 (pp. 1149-1154) Bergamo, Italy: ELSEVIER.

## Referencia electrónica

Kęsek, Bogacz, Migza, M. (2019), *The application of Lean Management and Six Sigma tools in global mining enterprises*, 2nd International Conference on the Sustainable Energy and Environmental Development; DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012090.