

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**“OPTIMIZAR LA RENTABILIDAD OPERATIVA DE LA
CAL EXTRAYENDO ROCA CALIZA DE LA ZONA 3 DE LA
CANTERA AYACUCHO EN CAL Y CEMENTOS SUR –
CARACOTO.”**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. GERMAN FLORES ASQUI

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

PUNO - PERÚ

2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**“OPTIMIZAR LA RENTABILIDAD OPERATIVA DE LA CAL EXTRAYENDO ROCA
CALIZA DE LA ZONA 3 DE LA CANTERA AYACUCHO EN CAL Y CEMENTOS
SUR – CARACOTO.”**

TESIS PRESENTADA POR:

**Bachiller: GERMAN FLORES ASQUI
INGENIERO DE MINAS**

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

Presidente

:

Ing. Amilcar G. Teran Dianderas

Primer Miembro

:

Ing. Arturo R. Chayña Rodriguez

Segundo Miembro

:

M.Sc. Ing. Lucio R. Mamani Barraza

Director/Asesor

:

Ing. David Velásquez Medina

Área: Ingeniería de Minas.

Tema: Análisis de Costos Mineros y Comercialización de Minerales.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 27-05-2019

DEDICATORIA

A Dios, quien está conmigo siempre, nunca me ha desamparado y en el todo lo puedo, porque Él me fortalece; y a mis amados hijos Fabiola Ariana y Antony Valentino Flores Palomino, quienes, con su sonrisa, me recuerdan que tengo motivos para seguir adelante.

A Justina Asqui castro, mi madre que con amor me dio la oportunidad de ser un profesional y mis abuelos Valentín y Silveria por su apoyo incondicional.

A mis hermanos Mary, Marcos y Jesus por su apoyo; y a mi sobrina Yennifer y primo Eduardo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante la elaboración de mi tesis.

Agradezco a la Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Escuela profesional de Ingeniería de Minas, que mediante los docentes lograron brindarme vivencias, conocimientos y orientación vocacional para así lograr mis objetivos.

Agradezco y dedico la presente a mi amada esposa Nury Palomino Callomamani, que con apoyo incondicional y gran amor me impulsa y motiva a la culminación de mis metas. Asimismo, a su mamá Rufina Callomamani por darme la oportunidad de seguir adelante.

Al Ing., Enrique B. Sanca Mercado por la oportunidad y el apoyo que me ha brindado en mi desarrollo profesional y personal, así como a todas las personas que colaboraron conmigo.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE FÍGURAS	ix
ÍNDICE TABLAS	xi
RESUMEN:	xiii
ABSTRACT.....	xiv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.	Descripción del problema:.....	15
1.2.	Formulación del problema:.....	16
1.2.1.	Problema general.	16
1.2.2.	Problemas específicos.	16
1.3.	Objetivos de la investigación:	17
1.3.1.	Objetivo general.	17
1.3.2.	Objetivos específicos.....	17
1.4.	Justificación de la investigación:.....	17
1.5.	Limitaciones del estudio:.....	19

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	Antecedentes de la investigación:	20
2.2.	Marco teórico:	22
2.2.1.	Minado en canteras no metálicas.....	22

2.2.1.1.	Extracción de rocas calcáreas o calizas.	23
2.2.1.2.	Operaciones unitarias de minado en las canteras no metálicas.	23
2.2.1.2.1.	Perforación.	24
2.2.1.2.2.	Voladura.	25
2.2.1.2.3.	Carguío.	25
2.2.1.2.4.	Transporte.	26
2.2.1.2.5.	Servicios auxiliares.	27
2.2.2.	Costos de minado en las canteras no metálicas.	27
2.2.2.1.	Costos de perforación.	28
2.2.2.2.	Costos de voladura.	28
2.2.2.3.	Costos de carguío.	29
2.2.2.4.	Costos de transporte.	30
2.2.2.5.	Costos de los servicios auxiliares.	30
2.2.3.	Investigación de operaciones.	31
2.2.3.1.	Concepto y definición.	31
2.2.3.2.	Metodología de la investigación de operaciones.	32
2.2.3.2.1.	Definición del problema operativo.	32
2.2.3.2.2.	Construcción del modelo matemático.	33
2.2.3.2.3.	Resolución del modelo matemático.	40
2.2.3.2.4.	Implementación de la solución y validación.	41
2.3.	Softwares utilizados:	46
2.3.1.	MS Excel – Solver.	46
2.3.2.	Hexagon - MineSight.	48
2.4.	Formulación de la hipótesis:	48
2.4.1.	Hipótesis general.	48
2.4.2.	Hipótesis específicas.	48

CAPÍTULO III**MATERIALES Y MÉTODOS**

3.1.	Diseño metodológico:.....	49
3.1.1.	Tipo de investigación.	49
3.1.2.	Alcance.	49
3.1.3.	Diseño de la investigación.	50
3.2.	Población y muestra:	51
3.2.1.	La población.	51
3.2.2.	Las muestras.	51
3.2.2.1.	Área de geología.	51
3.2.2.2.	Área de operaciones de minado.	53
3.2.2.3.	Área de procesamiento/planta.	57
3.2.2.4.	Área de planeamiento.	58
3.3.	Definición y operacionalización de variables:	60
3.4.	Técnicas de recolección de datos:	61

CAPÍTULO IV**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1.	Aspectos generales del área de estudio	63
4.1.1.	Ubicación y acceso.	63
4.1.2.	Geología general.	63
4.1.3.	Planeamiento y diseño de la cantera.	64
4.1.4.	Operación de minado en la cantera Ayacucho.	65
4.2.	Determinando con un modelo matemático el tonelaje y ley óptima de roca caliza a extraerse de la zona 1, 2 y 3:	66
4.2.1.	Definición de problema operativo de la cantera Ayacucho.	66
4.2.2.	Construcción del modelo matemático para la cantera Ayacucho.	67

4.2.3.	Resolución del modelo matemático de la cantera Ayacucho.	72
4.3.	Verificando la recuperación metalúrgica de la cal y los costos de minado obtenidos al extraer roca caliza de la zona 1, 2 y 3:	74
4.3.1.	Diseño del plan de minado mensual.	75
4.3.1.1.	Plan de minado mensual de octubre 2018.	75
4.3.2.	Impactos y repercusiones operacionales.	86
4.3.2.1.	Costos de minado en la cantera Ayacucho.	87
4.3.2.1.1.	Los costos en perforación.	87
4.3.2.1.2.	Los costos en voladura.	87
4.3.2.1.3.	Los costos en carguío y transporte.	88
4.3.2.1.4.	Los costos en servicios auxiliares.	89
4.3.2.2.	Roca caliza minada y procesada en la cantera Ayacucho.	92
4.3.2.3.	Recuperación metalúrgica de la cal.	94
4.4.	Evaluando la rentabilidad operativa de la cal habiéndose minado la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho.....	96
4.5.	Discusión de los resultados:	99
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES.....	102
	REFERENCIAS.....	103
	ANEXOS	105

ÍNDICE FIGURAS

Figura 2.1: Vista de una cantera de caliza.	22
Figura 2.2: Perforadora con martillo en cabeza y con martillo en fondo.	24
Figura 2.3: Secuencia de amarre de taladros en una cantera.	25
Figura 2.4: Carguío de mineral con una excavadora.	26
Figura 2.5: Transporte de mineral hacia las pilas de mineral de planta.	27
Figura 2.6: Vista del modelo matemático digitado en una hoja de Excel.	40
Figura 2.7: Vista de la hoja de respuestas en Excel.	41
Figura 2.8: Síntesis de un plan de minado mensual.	42
Figura 2.9: Reporte de reservas por destino, zona, periodo y polígono.	43
Figura 2.10: Archivo de un diseño de malla xx.csv para programas de voladura.	43
Figura 2.11: Vista del diagrama de Gantt para un plan de minado.	44
Figura 2.12: Vista del tonelaje de material y ley programado.	45
Figura 2.13: Vista del tonelaje de material y ley ejecutado – logrado/oficial.	46
Figura 2.14: Vista de la ventana de Opciones de Excel.	47
Figura 2.15: Vista de la ventana de Complementos.	47
Figura 3.1: Vista de la distribución topográfica de las 3 zonas de minado de la Cantera Ayacucho.	52
Figura 3.2: Ingreso por ventas de cal como consecuencia de la RM.	59
Figura 3.3: Esquema para la variable independiente – experimentación.	61
Figura 3.4: Esquema para la variable dependiente – línea de base.	62
Figura 4.1: Modelo matemático de la cantera Ayacucho resuelto por Solver.	72
Figura 4.2: Hoja de respuestas proporcionado por Solver.	74
Figura 4.3: Vista grafica de la producción por semanas del mes de octubre.	77
Figura 4.4: Vista grafica de la producción por zonas del mes de octubre.	79

Figura 4.5: Vista distribución porcentual de la producción por zonas del mes de octubre.	80
Figura 4.6: Diseño de la producción de la zona 1 para el mes de octubre.	81
Figura 4.7: Diseño de la producción de la zona 2 para el mes de octubre.	82
Figura 4.8: Diseño de la producción de la zona 3 para el mes de octubre.	83
Figura 4.9: Lienzo del proceso de producción para el mes de octubre – MM.	84
Figura 4.10: Vista gráfica de la cal recuperada vs las toneladas de mineral extraído... ..	85
Figura 4.11: Variación de los costos de minado antes y después de la zona 3.	92
Figura 4.12: Variación de la recuperación metalúrgica antes y después de la zona 3... ..	95
Figura 4.13: Análisis comparativa de las utilidades operativas.	98
Figura 4.14: Fluctuación de las toneladas procesadas versus la RM%.	99

ÍNDICE TABLAS

Tabla 2.1.: Datos del tiempo de mezclado y purificado.	38
Tabla 3.1.: Reservas seleccionadas por zonas de la cantera Ayacucho.	53
Tabla 3.2.: Costo de perforación e índices operacionales de la zona 1 y 2.	53
Tabla 3.3.: Costo de perforación e índices operacionales de la zona 3.	54
Tabla 3.4.: Costo de voladura íntegra de las tres zonas de minado.	54
Tabla 3.5.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 1.	55
Tabla 3.6.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 2.	55
Tabla 3.7.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 3.	55
Tabla 3.8.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 1.	56
Tabla 3.9.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 2.	56
Tabla 3.10.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 3.	57
Tabla 3.11.: Datos operativos y costos de procesar la roca caliza.	58
Tabla 3.12.: Producción diaria, mensual y anual de mineral en planta y mina.	58
Tabla 3.13.: Rentabilidad operativa de la cal antes de la inclusión de la zona 3.	59
Tabla 3.14.: Operacionalización de la variable independiente.	60
Tabla 4.1.: Parámetros de diseño de la cantera Ayacucho.	65
Tabla 4.2.: Parámetros de diseño de la cantera Ayacucho.	68
Tabla 4.3.: Objetivos operacionales para el plan de minado mensual.	73
Tabla 4.4.: Objetivos operacionales para el mes de octubre 2018.	75
Tabla 4.5.: Calendario de producción de octubre 2018.	76
Tabla 4.6.: Producción de octubre 2018 por semanas.	76
Tabla 4.7.: Producción de octubre 2018 por zonas de minado.	78
Tabla 4.8.: Cal recuperado por semana para una RM igual a 71.50%.	85
Tabla 4.9.: Costos de minado proyectado para el mes de octubre.	86
Tabla 4.10.: Costos de perforación después de incluir la zona 3.	87

Tabla 4.11.: Costos de voladura después de incluir la zona 3.	88
Tabla 4.12.: Costos de carguío y transporte después de incluir la zona 3.	89
Tabla 4.13.: Costos de servicios auxiliares mina después de incluir la zona 3.	90
Tabla 4.14.: Resumen de los costos de minado reales al incluir la zona 3.	90
Tabla 4.15.: Análisis de variación entre los costos de minado proyectado y reales.	91
Tabla 4.16.: Variación en costos de minado reales antes y después de la zona 3.	91
Tabla 4.17.: Variación entre el tonelaje y ley cumplido vs el programado en minado.	93
Tabla 4.18.: Variación entre el tonelaje y ley procesado vs el target en planta.	93
Tabla 4.19.: Variación de la recuperación metalúrgica de la cal proyectada/operativa.	94
Tabla 4.20.: Variación del RM (%) de la cal antes y después de incluir la zona 3.	95
Tabla 4.21.: Rentabilidad operativa de la cal después de incluir a la zona 3.	96
Tabla 4.22.: Variación de la utilidad operativa proyectada/operativa.	97
Tabla 4.23.: Análisis comparativo de la rentabilidad operativa con y sin la zona 3.	97

RESUMEN

En Cal y Cementos Sur – Caracoto se extrae roca caliza proveniente de la cantera Ayacucho para elaborar cal. La cantera Ayacucho posee una amplia zona de minado que se divide en tres partes: Zona 1, Zona 2 y Zona 3. Para minimizar los costos minado, la operación de la cantera Ayacucho se venía realizando solamente en las zonas 1 y 2. Sin embargo, desde junio del 2018, la recuperación metalúrgica de la cal presento una caída de 71.15% a 63.42% en promedio, es decir, 7.73% menos. Esto se debido a que la caliza kárstica minada de la zona 2 de la cantera Ayacucho presentaba una baja pureza, ya que las leyes promedio mensuales oscilaron entre 51.15% a 52% de CaCO_3 . Esta baja en la ley de la caliza asociado a una baja recuperación metalúrgica, han afectado la rentabilidad operativa mensual de cal generando pérdidas mensuales de hasta US\$. 652,152.53. La zona 3 de la cantera Ayacucho es una zona más alejada y dispersa que la zona 1 y 2, por lo que todavía no ha sido minada, ya que su costo de minado es hasta 8.40% más que el de la zona 1 y 2. No obstante, la zona 3 posee un total de 1.73 millones de TM de caliza kárstica con una ley promedio de 53.28% de CaCO_3 , lo cual al ser minada podría mejorar la ley promedio y mejorar la recuperación metalúrgica de la cal. Es por ello que, el objetivo de esta investigación es optimizar la rentabilidad de la cal extrayendo roca caliza de la zona 3 de la cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur – Caracoto. Para ello, esta investigación fue de tipo explicativo y aplicativo con un diseño experimental, en el que se elaboró un modelo matemático con todos los datos operativos y costos de la zona 1, 2 y 3. Luego se determinó, usando el software Solver, una producción de roca caliza de 30% para la zona 1, 8% para la zona 2 y 62% para la zona 3; proyectándose una rentabilidad operativa de US\$ 4'677,291.04 por mes. Después de eso, a través del diseño del plan de minado mensual, se ejecutó la producción de roca caliza por el área de operaciones mina de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho; en donde los costos de minado se incrementaron en un 11.95% en promedio más; no obstante, la recuperación metalúrgica de la cal se mejoró en un 10.53% en promedio. Finalmente, realizando el balance costo-beneficio, se logró optimizar la rentabilidad operativa en Cal y Cementos Sur – Caracoto de US\$ 4'072,141.99 a US\$ 4'677,291.04 en promedio; es decir, 17.74% más.

Palabras claves: Rentabilidad, costos de minado, costo - beneficio, modelo matemático, cantera Ayacucho.

ABSTRACT

In Cal y Cementos Sur - Caracoto, limestone is extracted from the Ayacucho quarry in order to make lime. The Ayacucho quarry has a large mining area that is divided into three parts: Zone 1, Zone 2 and Zone 3. To minimize mined costs, the operation of the Ayacucho quarry was carried out only in zones 1 and 2. However, since June 2018, the metallurgical recovery of lime showed a drop from 71.15% to 63.42% on average, that is, 7.73% less. This is due to the fact that the mined karstic limestone of zone 2 of the Ayacucho quarry presented a low purity, since the monthly average grades ranged from 51.15% to 52% of CaCO_3 . This decrease in the limestone law associated with a low metallurgical recovery has affected the monthly operating profitability of lime generating monthly losses of up to US\$ 652,152.53. Zone 3 of the Ayacucho quarry is a more distant and dispersed zone than zone 1 and zone 2, so it has not yet been mined, It being its cost of mining 8.40% more than that of zone 1 and 2. However, zone 3 has 1.73 million MT of karstic limestone with an average grade of 53.28% CaCO_3 , which upon mining; it would be able to improve the average grade and improve the metallurgical recovery of lime. Therefore, the objective of this research is to optimize the profitability of lime by extracting limestone from zone 3 of the Ayacucho quarry in Cal and Cementos Sur - Caracoto. For this, this research was of an explanatory and applicative type with an experimental design, in which a mathematical model was elaborated with all the operational data and costs of zone 1, 2 and 3. Then, using the Solver software, it was projected an operating profitability of US \$ 4'677,291.04 per month for a limestone rock production of 30% for zone 1, 8% for zone 2 and 62% for zone 3. After that, through the design of the monthly mining plan, the production of limestone was executed by the mine operations area of zone 1, 2 and 3 of the Ayacucho quarry; where mining costs increased by 11.95% on average more; however, the metallurgical recovery of lime was improved by 10.53% on average. Finally, making the cost-benefit balance, it was possible to optimize the operating profitability in Cal and Cementos Sur - Caracoto from US\$ 4'072,141.99 to US \$ 4'677,291.04 on average; that is, 17.74% more.

Keywords: Profit, mining costs, cost-benefit, mathematical model, Ayacucho quarry.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del problema

En Cal y Cementos Sur – Caracoto se elabora principalmente cal que se obtiene al procesar roca caliza proveniente de la cantera Ayacucho. La cantera Ayacucho posee una amplia zona de minado que se divide en tres partes: Zona 1, Zona 2 y Zona 3. Actualmente, solo se mina la roca caliza de zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho para concentrar las operaciones de minado y minimizar los costos minado. No obstante, hace algunos meses, la roca caliza extraída de la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho ha tenido una ley promedio mensual que oscilo entre 51.14% a 52% de Ca, el cual ha estado debajo de ley programada mensual. Esto ha perjudicado a la recuperación metalúrgica de la cal, pues de acuerdo a los reportes de planta, la recuperación metalúrgica de la cal ha caído de 71.15% en promedio a 63.42% promedio, es decir, 7.73% menos que la recuperación metalúrgica mínima aceptada. Esta baja ley en la caliza y la baja recuperación metalúrgica, consecuentemente, han afectado la rentabilidad operativa mensual de cal generando pérdidas mensuales de hasta 652,152.53 US\$ en promedio en Cal y Cementos Sur – Caracoto. La zona 3 de la cantera Ayacucho todavía no ha sido minada y según el último control de mineral por parte de Geología, la zona 3 posee un total de 1.94 millones de TM de caliza kárstica con una ley promedio de 53.68% de Ca y un total de 1.85 millones de TM de caliza masiva negra con una ley promedio de 51.75% de Ca. Sin embargo, la zona 3 es una zona más alejada y dispersa que la zona 1 y 2, por lo que su costo de minado es hasta 8.4% más que el de la zona 1 y 2 de la Cantera Ayacucho.

Para aumentar la recuperación metalúrgica de la cal será necesario extraer caliza kárstica de la zona 3 de la cantera Ayacucho con lo que se extendería la operación de minado y se incrementarían los costos de perforación, carguío y transporte. No obstante, minar un tonelaje y una ley óptima de la roca de la zona 3 en conjunto con la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho minimizaría el incremento de los costos de minado, y permitiría mejorar la performance de la recuperación metalúrgica de la cal a más de 71.50% en promedio, esto dentro de un balance costo - beneficio optimizaría la rentabilidad operativa de la cal.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Se podrá optimizar la rentabilidad operativa de la cal extrayendo roca caliza de la zona 3 de la Cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur - Caracoto?

1.2.2. Problemas específicos.

- a) ¿Cuánto debe ser el tonelaje y ley óptima de la roca caliza que se minará de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho que maximice la rentabilidad operativa de la Cal?
- b) ¿Cuánto se incrementará la recuperación metalúrgica de la cal y los costos de minados al extraerse roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho?
- c) ¿Al procesar mineral de la zona 1 y zona 2 con la zona 3 de la Cantera Ayacucho se optimizará la rentabilidad de la cal en Cal y Cementos Sur - Caracoto?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general.

Optimizar la rentabilidad operativa de la cal extrayendo roca caliza de la zona 3 de la Cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur - Caracoto.

1.3.2. Objetivos específicos.

- a) Determinar mediante un modelo matemático el tonelaje y ley óptima de la roca caliza que se deberá extraer de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho para maximizar la rentabilidad operativa de la cal.
- b) Verificar la recuperación metalúrgica de la cal y los costos de minado obtenidos al extraer roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho.
- c) Evaluar la rentabilidad operativa de la cal habiéndose minado la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur – Caracoto.

1.4. Justificación de la investigación:

La operación diaria de extracción de los recursos mineral a pesar de ser rutinario, presenta mucha variabilidad que se condiciona a factores externos como también internos. En el horizonte a largo plazo en donde se realiza la proyección de la operación no se atiende esta variabilidad pues el largo plazo solo se basa en datos promedios; no obstante, al corto plazo, es el horizonte operativo que debe resolver satisfactoriamente esta variabilidad. Según refiere Morales (2011), la recuperación metalúrgica es una de las variables más importantes que debe atender la operación de minado y el planeamiento a corto plazo, pues la eficacia de la recuperación metalúrgica, así como el tonelaje objetivo condicionan en gran manera la rentabilidad operativa de una mina.

En Cal y Cementos Sur – Caracoto que extrae caliza de la Cantera Ayacucho, posee una zona muy amplia de minado de 1,030 has, la cual, para no dispersar las operaciones, ha dividido su área operativa en 3 zonas. Actualmente en la Cantera Ayacucho se extrae

caliza de la zona 1 y 2. Ya después de varios años operativos, en los últimos meses la recuperación metalúrgica ha sufrido una caída en su eficiencia ya que la pureza de la caliza de la zona 1 y 2 advertido las expectativas propuestas en el plan de minado anual. Esto, consecuentemente, ha generado pérdidas en la rentabilidad operativa de la Cal. Es por ello Cal y Cementos Sur – Caracoto ha decidido expandir su operación hacia la zona 3 (zona más alejada) para lograr extraer caliza de mejor pureza, no obstante, es estrategia incrementaría los costos de minado pues reduciría la disponibilidad de los equipos de perforación, carguío, transporte y servicios auxiliares por la gran extensión que tendrían que cubrir para extraer una tonelada de caliza. Asimismo, la distancia de transporte se incrementaría, con cual serían necesario más volquetes de 15 m³. Todo ello implicaría un incremento en los costos de minado.

La necesidad de impulsar la rentabilidad operativa de la cal ha llevado a hacernos la siguiente pregunta: ¿Se podrá optimizar la rentabilidad operativa de la cal extrayendo roca caliza de la zona 3 de la Cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur - Caracoto?, el mismo que lleva a hacernos preguntas más específicas como: ¿cuánto debe ser el tonelaje y ley óptima de la roca caliza que se minará de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho que maximice la rentabilidad operativa de la Cal?, ¿cuánto se incrementará la recuperación metalúrgica de la cal y los costos de minados al extraerse roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho?, y ¿al procesar mineral de la zona 1 y zona 2 con la zona 3 de la Cantera Ayacucho se optimizará la rentabilidad de la cal en Cal y Cementos Sur - Caracoto?.

En consecuencia, el presente proyecto de tesis es de gran relevancia, pues para lograr optimizar la rentabilidad se deberá contestar cada pregunta específica, primero, desarrollando un modelo matemático de acuerdo a Cuentas, Mathur y Solow (2012) que según refieren estos autores el modelo matemático a elaborarse para la cantera Ayacucho debe ser de tipo determinístico, es decir, debe contemplar todo los datos que se involucran en la rentabilidad operativa de la cal como son los costos de minado, la ley promedio de la caliza, la ley de cabeza de la planta, el tonelaje máximo – mensual procesado por planta y el valor de venta de la cal, esto permitirá, utilizando el Solver – Excel, determinar un tonelaje y una ley óptima de roca caliza a minarse de cada zona la cantera Ayacucho cumpliendo función objetivo de maximizar la rentabilidad operativa de la cal. Segundo, deberá verificarse si la recuperación metalúrgica mejora procesando caliza de las zonas

1, 2 y 3; así como también, cuanto se incrementa los costos de minado al implementarse al solución del modelo; finalmente, se hará una balance de costo – beneficio para evaluar la rentabilidad operática obtenida de la Cal minándose roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho.

1.5. Limitaciones del estudio:

Las limitaciones de este estudio básicamente son:

- Muchos de los datos de la cantera Ayacucho no han estado disponibles, pero si se contó con la data necesaria para llevar a cabo esta investigación.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación:

Se tienen los siguientes antecedentes para esta investigación:

Condori (2013). Tesis titulada: “*Reducción de Costos mediante La Optimización del Planeamiento a Corto Plazo en la Unidad Minera Pampa de Cobre.*” Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. El presente trabajo tiene por objetivo explicar la optimización del planeamiento a corto plazo en la U.M. Pampa de Cobre para lograr la reducción de costos de producción. Esta investigación fue de tipo descriptivo de diseño experimental; en el cual se midió la mejora de las operaciones unitarias como perforación, carguío y transporte con la implementación de del sistema Dispatch. Este sistema permitió monitorear cada faena, determinando falencias, retrasos operativos, y el sobre costo operativo. El Dispatch logro mejorar la disponibilidad de las perforadoras, usándose solo una perforadora en lugar de dos, reduciéndose así los costos de perforación de 0.189 US\$/TM a 0.183 US\$/TM; asimismo, en transporte, con un despacho dinámico de los camiones de transporte, se logró aumentar en 8% la productividad de la flota con lo cual se redujo el costo de transporte de 0.385 US\$/TM a 0.365 US\$/TM. Solo la mejora en transporte compenso la inversión del sistema Dispatch que fue de US\$ 900,000. Lo que no se hizo en esta investigación es implementar una mejora en voladura, pues los costos de voladura representan un 15% a 20% del total del costo de minado, por lo que, la optimización de esta operación unitaria optimizaría aún más la performance de operación de la mina.

Cuentas (2012). Titulada: “*Research of Mining Operations*”. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano – Puno. En su ejemplo aplicativo del Sindicato Minero Pacococha S.A, que venía soportando un incesante incremento en sus costos operativos, se determinó minar las vetas Colquechaca y 10 de mayo. La veta Colquechaca tenía una ley promedio de Plata igual a 4 oz/TM, de plomo de 3.5% y un costo de producción igual a 7.0 US\$/TM; mientras que la veta 10 de mayo tenía una ley promedio de Plata igual a 16 oz/TM, de plomo de 1.15% y un costo de producción igual a 9.0 US\$/TM. La producción debía cumplir con las restricciones de planta que tenía una capacidad máxima de 95 TM por día una ley de cabeza mínima de 6 oz/TM de plata y máxima de 8 oz/TM de plata. Para poder determinar una solución satisfactoria, se construyó un modelo matemático tipo determinístico que tenía como función objetivo “maximizar la ganancia por venta de mineral”. En la solución del modelo matemático con Solver de MS Excel, se determinó producir 63.33 TM/día de la veta Colquechaca y producir 31.67 TM/día de la veta 10 de mayo, con un margen de ganancia total de US\$ 18,446.15 por día. Este ejemplo aplicativo se utilizará para generar un modelo matemático en Cal y Cementos Sur – Caracoto con la función objetivo de maximizar la ganancia operativa de la cal.

Alvear, López, Pindo y Proaño (2011). Tesis titulada: “*Diseño y Análisis Económico de la Explotación a Cielo Abierto de un Yacimiento de Caliza.*” Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador. El presente trabajo tiene por objetivo ejecutar un análisis económico de acuerdo a los costos de producción para determinar la rentabilidad del proyecto. Esta investigación fue de tipo aplicativo de diseño experimental; en el que primero se diseñó la excavación de la cantera no metálica para minar caliza en bancos de 10 m y un ancho de minado de 8 m, asimismo se determinó el total de reservas del yacimiento que ascendían a 682, 640 m³ de mineral para una vida operativa de 5 años. Segundo se generó un plan de minado que comprendía la utilización de camiones volquete que iban a transportar la caliza desde la cantera hasta la planta chancadora. Tercero, se evaluó la rentabilidad de proyecto que con los camiones necesitaba una inversión inicial de US\$ 452,000; dando como resultado un VAN de US\$ 24,412, para un periodo de recuperación de 4.7 años y un TIR de -40%. Esto descartaba al proyecto, por lo que se prescindió del uso de camiones optando por la alternativa de caída libre de material en un solo punto de acopio, con ello se logró un VAN de US\$ 156,986 y un TIR de 12%. Lo que no se hizo en esta investigación es analizar la posibilidad de incluir una “Servis” para la operación de carguío y transporte, pues con

ello también se elimina la inversión para los camiones, y solamente se tendría costos variables que podrían ser cargados a la rentabilidad anual, ya que con la caída libre de material en un solo punto de acopio se pierde la selectividad en el mineral.

2.2. Marco teórico:

2.2.1. Minado en canteras no metálicas.

Según Herrera (2006), canteras es el término genérico para referirse a la extracción de rocas industriales, ornamentales y de materiales de construcción. Todos estos recursos son no metálicos y constituyen, con mucho, el sector más importante en cuanto a número, ya que desde hace mucho tiempo se han minado para extraer y abastecer de materias primas usados en la construcción y en obras de infraestructura.

El método de explotación utilizada en las canteras suele ser el banqueo con altura de banco de 2 m hasta 10 m de altura, con uno o varios niveles, y situados por lo general a media ladera. Véase la siguiente imagen:



Figura 2.1: Vista de una cantera de caliza.

Fuente: footage.framepool.com.

2.2.1.1. Extracción de rocas calcáreas o calizas.

De acuerdo a Guerrero (2001), la caliza es una roca calcárea estratificada compuesta principalmente de mineral calcita (CaCO_3) con porcentajes variables de impurezas. Cuando la caliza ha estado a la intemperie y a fuertes acciones de la lluvia se le conoce como caliza kárstica. Una caliza que contenga entre 30% y 45% de carbonato de magnesio se clasifica como dolomítica y está compuesta principalmente por el mineral dolomita. Asimismo, la coloración de las calizas puede variar entre blanca, roja, parda hasta gris o negra dependiendo de las impurezas que contenga. Su consistencia puede ser porosa como también masiva.

La extracción de la roca caliza de las canteras es para fabricar cemento y cal viva. El cemento se fabrica por calcinación de la caliza relativamente pura (por lo general de baja pureza) y este es utilizado en la construcción y otras obras civiles. En tanto la cal viva, también se obtiene por calcinación de la caliza de alta pureza a más de $2,000\text{ }^\circ\text{C}$, el cual es utilizado en múltiples procesos químicos en la industria moderna.

2.2.1.2. Operaciones unitarias de minado en las canteras no metálicas.

Según refieren Hustrulid, Kuchta, Bustillo y López (2006), el proceso de minado que se realiza en las canteras no metálicas pueden ser tipo simple y de tipo clásico. El proceso clásico de minado dentro de las canteras posee dos variantes: por gravedad y por circuito.

- *El minado por gravedad.* - Este tipo de minado prescinde del uso de una flota de equipos de carguío y transporte, utilizando únicamente equipos de carguío. El transporte de material dentro de la cantera se reemplaza por el acopio de mineral en un solo punto ubicado en un nivel inferior. A este punto de acopio se vuelca el mineral de bancos superiores usando la gravedad para luego ser cargado a la chancadora. El punto débil de este método pasa por que la cantera debe estar muy cerca de la planta industrial.
- *El minado por circuito.* - Este tipo de minado que generalmente se ve en el minado a tajo abierto, en el que sí se cuenta con una flota de equipos de carguío y transporte para el traslado de mineral y desmonte. La envergadura de este

tipo de operaciones es más grande y flexible en comparación al minado por gravedad, asimismo, la grado de selectividad es mejor y sobre todo es no se necesita que la planta industrial este cerca de la cantera.

Las operaciones unitarias de minado en el minado por circuito de las canteras no metálicas están comprendidas por:

A. Perforación.

Conforme a Bernaola, Castilla y Herrera (2013), la perforación en las canteras no metálicas es realizada por equipos de percusión neumática, de tipo martillo en cabeza como el track – drill y de tipo martillo en fondo como el tripulado. Los diámetros de taladros utilizados varían de 3” hasta 6” como máximo, los cuales realizan trazos de cualquier tipo con dimensiones que varían desde 1.60 m hasta 4.50 m. Véase la siguiente figura:



Figura 2.2: Perforadora con martillo en cabeza y con martillo en fondo.

Fuente: Bernaola, Castilla y Herrera (2013).

B. Voladura.

De acuerdo a EXSA S.A. (2011), la voladura en las canteras no metálicas es realizada de forma convencional. La iniciación de los taladros es de tipo pirotécnico con combinaciones del sistema Nonel. El carguío de los taladros se hace de forma manual utilizando por lo general Anfo y Slurries. En algunos casos se hace uso de softwares para el diseño y análisis de las voladuras, sin embargo, aun predomina el modo empírico. Véase la siguiente figura:



Figura 2.3: Secuencia de amarre de taladros en una cantera.

Fuente: footage.framepool.com.

C. Carguío.

De acuerdo a MI57E - Explotación de Minas (2007), el carguío en las canteras se realiza con unidades discretas sin acarreo como las excavadoras que tienen una capacidad que varía de 1.90 m^3 hasta 3.90 m^3 ; y también con equipos de acarreo mínimo como los cargadores frontales de 2.80 m^3 hasta 4.50 m^3 . Véase la siguiente figura:



Figura 2.4: Carguío de mineral con una excavadora.

Fuente: Minera Gold Fields.

D. Transporte.

De acuerdo a MI57E - Explotación de Minas (2007), el transporte de material en las canteras se realiza con camiones sin camino fijo de 15 m³ hasta 20 m³.

Estos camiones volquete se desplazan en una red básica de transporte que parte de los frentes de minado y llegan hasta un acopio ya sea pilas de mineral o un botadero. En caso de la pila mineral, este es transportado hacia la chancadora para proseguir el proceso de concentración. Véase la siguiente figura:



Figura 2.5: Transporte de mineral hacia las pilas de mineral de planta.

Fuente: Mina Tacaza.

E. Servicios auxiliares.

De acuerdo a BS Consultores (2009), los servicios auxiliares en las canteras comprenden a equipos como: tractores, camiones cisterna, motoniveladoras, camionetas y cargadores frontales.

El trabajo realizado por los servicios auxiliares en las canteras viene dado por el mantenimiento de vías, logística de material y apoyo, construcción de botaderos, acondicionamiento para perforación y transporte del mineral desde las pilas hasta la chancadora.

2.2.2. Costos de minado en las canteras no metálicas.

Los costos de minado en las canteras no metálicas se agrupan de acuerdo a cada operación unitaria de minado, siendo muy parecidas a los costos incurridos en la minería a tajo abierto. Cabe mencionar que estos costos son operativos y no comprenden ni al personal ni supervisión que están en el rubro de administración. Estos son:

2.2.2.1. Costos de perforación.

Según refiere Anchorena y BS Consultores (2015), los costos de perforación en canteras no metálicas fluctúan del 8% al 12% del costo total de minado. El costo de la perforadora se valoriza en US\$/m y depende de las siguientes variables: Costo de broca, costos de los aceros que está directamente relacionado a sus rendimientos, consumo de diésel y el ratio de penetración. Al relacionar el costo de la perforadora con los parámetros geométricos de perforación de cada malla se obtiene el costo de perforación por tonelada. Para estimar el costo de perforación se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

$$CP = \frac{CMP \times (Hb + SP)}{B \times E \times Hb \times D_r} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$CP = \frac{CMP \times (MPd)}{TTd} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

CP = Costo de perforación por tonelada en US\$/TM.

CMP = Costos por metro perforado o de la perforadora en US\$/m.

Hb = Altura de banco en metros.

SP = Sobreperforación en metros.

B y E = Burden y espaciamiento en metros.

Dr = Densidad de la roca en TM/m³.

MPd = Metros perforados totales del disparo en m/disp.

TTd = Tonelaje total del disparo en TM/disp.

2.2.2.2. Costos de voladura.

Según refiere Anchorena y BS Consultores (2015), los costos de voladura en canteras no metálicas fluctúan del 8% al 10% del costo total de minado. El costo de voladura se compone del costo de primado que depende del sistema de iniciación y el costo de la

mezcla a utilizar que depende de los parámetros geométricos de la malla. Para estimar el costo de voladura se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

$$CV = \frac{Cex \times CM + CPr}{B \times E \times Hb \times Dr}$$

Ecuación 3

$$CV = \frac{CTal \times N^{\circ}tal}{TTd}$$

Ecuación 4

Donde:

CV = Costo de voladura por tonelada en US\$/TM.

CTal = Costos por taladro en US\$/tal.

CM = Costo de la mezcla explosiva en US\$/Kg.

CPr = Costo de la mezcla explosiva en US\$.

B y E = Burden y espaciamiento en metros.

Hb = Altura de banco en metros.

Dr = Densidad de la roca en TM/m³.

N^otal = Número total del taladros en el disparo en tal/disp.

TTd = Tonelaje total del disparo en TM/disp.

2.2.2.3. Costos de carguío.

Conforme a MVCS y BS Consultores (2009), los costos de carguío en canteras no metálicas fluctúan del 15% al 25% del costo total de minado. El costo del equipo de carguío se valoriza en US\$/hora, el cual comprende a su costo fijo (valor de compra, interés y manteniendo del equipo) y su costo variable (costo por desgaste de componentes y uso de recursos). Al relacionar el costo horario del equipo de carguío con la operación y su respectiva producción se obtiene el costo de carguío por tonelada. Para estimar el costo de carguío se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$CC = \frac{CHc \times HTc}{TTc}$$

Ecuación 5

Donde:

CC = Costo de carguío por tonelada en US\$/TM.

CHc = Costo horario del equipo de carguío en US\$/hr.

HTc = Total de horas trabajadas por el equipo de carguío en horas.

TTc = Tonelaje total movido o cargado en TM.

2.2.2.4. *Costos de transporte.*

De acuerdo a MVCS y BS Consultores (2009), los costos de carguío en canteras no metálicas fluctúan del 40% al 50% del costo total de minado. El costo del equipo de transporte se valoriza en US\$/hora, el cual comprende a su costo fijo (valor de compra, interés y manteniendo del equipo) y su costo variable (costo por desgaste de componentes y uso de recursos). Al relacionar el costo horario del equipo de transporte con la operación y su respectiva producción se obtiene el costo de transporte por tonelada. Para estimar el costo de transporte se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$CT = \frac{CHt \times HTt}{TTt}$$

Ecuación 6

Donde:

CT = Costo de transporte por tonelada en US\$/TM.

CHt = Costo horario del equipo de transporte en US\$/hr.

HTt = Total de horas trabajadas por el equipo de transporte en horas.

TTt = Tonelaje total transportado en TM.

2.2.2.5. *Costos de los servicios auxiliares.*

Según refiere MVCS y BS Consultores (2009), los costos de los servicios auxiliares en canteras no metálicas fluctúan del 4% al 8% del costo total de minado. El costo de los equipos utilizados en los servicios auxiliares se valoriza en US\$/hora, el cual comprende a su costo fijo y su costo variable. Para obtener el costo por tonelada de los servicios

auxiliares es necesario relacionar el costo horario de los equipos de servicios auxiliares con el tonelaje producido en mineral. Para estimar el costo de los servicios auxiliares utilizar la siguiente fórmula:

$$CSA = \frac{E1(CH \times HT) + E2(CH \times HT) + \dots + En(CH \times HT)}{TTM}$$

Donde:

Ecuación 7

CSA = Costo de los servicios auxiliares por tonelada en US\$/TM.

CH = Costo horario del equipo en US\$/hr.

HT = Total de horas trabajadas por el equipo en horas.

Ej = Equipo determinado utilizado en los servicios auxiliares, siendo $j = 1, 2, \dots, n$.

TTM = Tonelaje de mineral total producido en TM.

2.2.3. Investigación de operaciones.

2.2.3.1. Concepto y definición.

En la ciencia de la administración, los administradores utilizan las matemáticas y las computadoras para tomar decisiones racionales en la resolución de problemas. Aunque en algunos problemas son lo bastante simples como para que un administrador pueda aplicar su experiencia personal para resolverlos, en el complejo mundo actual muchos problemas no pueden resolverse de esta manera. La evaluación de cada alternativa es demasiado difícil o tardada debido a la cantidad y complejidad de la información que debe ser procesada o porque el número de soluciones alternativas es tan vasto que un administrador simplemente no puede evaluarlas todas para seleccionar una apropiada (Mathur y Solow, 1996, p.2).

Las técnicas de la administración se aplican a las siguientes dos categorías básicas de problemas:

1. *Problemas determinísticos*, en los que toda la información necesaria para obtener una solución se conoce con certeza.

2. *Problemas estocásticos*, en los que parte se la información necesaria no se conoce con certeza, sino más bien, se comporta de una manera probabilística (Mathur y Solow, 1996, p.3).

2.2.3.2. *Metodología de la investigación de operaciones.*

De acuerdo a Mathur, Solow y Cuentas (1996), para resolver problemas determinísticos es necesario aplicar métodos cuantitativos que implican la participación de muchas áreas productivas. Asimismo, los métodos cuantitativos dentro de la investigación de operaciones poseen un proceso definido para resolver problemas que se puede ver a continuación:

A. *Definición del problema operativo.*

El problema operativo en la investigación no tiene nada que ver con el problema de un estudio de investigación, aunque si bien tienen cierta similitud, son aspectos muy distintos.

El problema operativo debe ser simple y conciso, en el que el objetivo que se busca lograr debe estar muy bien especificado así como todas las restricciones o limitaciones presentes. Hay una frase popular que dice: “mientras más clara la pregunta, la respuesta será más precisa. Así pues, el problema operativo no puede ser ambiguo, sino la solución determinada no resolverá el problema integro. Véase el siguiente ejemplo E-1:

Ejemplo E-1: Problema de planeación de producción de Case Chemicals:

Case Chemicals produce dos solventes: CS-01 y CS-02, en su planta de Cleveland. Las empresas que compran estos solventes lo usan para disolver ciertas sustancias tóxicas que se producen durante procesos de fabricación particulares. La planta opera 40 horas a la semana y emplea 5 trabajadores de tiempo completo y a 2 de tiempo parcial que trabajan 15 horas a la semana. Estas personas operan siete máquinas que mezclan ciertos

químicos para producir cada solvente. Los productos salen del departamento de mezclado para ser refinados en la planta de purificación, que actualmente tiene 7 purificadores y emplea a 6 trabajadores de tiempo completo y a uno de tiempo parcial que trabaja 10 horas a la semana.

Case Chemicals tiene una provisión casi ilimitada de la materia prima que necesita para producir los dos solventes. Asimismo, Case Chemicals puede vender cualquier cantidad de CS-01 que tiene un margen de ganancia de 0.30 US\$/gal; no obstante, la demanda del producto más especializados CS-02, está limitada a lo mas de 120 mil galones por semana y que tiene un margen de ganancia de 0.50 US\$/gal. En caso de que usted fuera el gerente de producción, ¿cuál sería el plan de producción semanal óptimo para Case Chemicals de modo que maximice la ganancia total?

B. Construcción del modelo matemático.

La construcción del modelo matemático es la parte más fundamental dentro del método cuantitativo. Pues si bien es importante comprender claramente el problema operativo, es más relevante expresar el problema operativo en una forma matemática, lo cual constituirá: el modelo matemático.

La construcción del modelo matemático se compone de las siguientes partes:

1. Identificación de las variables de decisión. - Consiste en hallar las variables cuyos valores proporcionarían la solución al problema operativo. Para ello es muy útil hacerse preguntas como: ¿Qué elementos afectan los costos o las ganancias?, ¿Qué elementos puede elegir y controlar libremente? Y ¿Qué decisiones tiene que tomar? O tomando la premisa de este párrafo ¿Qué valores una vez determinados, constituyen la solución para el problema?

En el ejemplo E-1, las variables de decisión serian:

Para este ejemplo, para identificarlas las variables de decisión será necesario preguntarse ¿qué información necesita proporcionar al personal de producción, los

departamentos de mezclado y purificación, para que sepan cómo proceder? Su respuesta a esta pregunta debería ser:

- 1.- El número de miles de galones de CS-01 por producir semanalmente.
- 2.- El número de miles de galones de CS-02 por producir semanalmente.

Como los valores de estos elementos no se conocen todavía, a cada variable de decisiones se le da un **nombre simbólico**. Usted puede elegir el nombre simbólico que le recuerde la cantidad que la variable de decisión representa. Para este ejemplo el nombre simbólico de las variables puede ser:

- CS1 = el número de miles galones de CS-01 por producir semanalmente
CS2 = el número de miles galones de CS-02 por producir semanalmente

Observe que estas descripciones son precisas. Incluyen las unidades asociadas con las cantidades que las variables representan (miles de galones, en este caso). No es suficiente definir una variable como la “cantidad” de un elemento, porque para las otras personas que leyeran su formulación, el término “cantidad” podría tener varios significados (por ejemplo, miles de litros en este caso).

2. Identificación de los datos del problema. - Consiste en listar los datos del problema operativo, así como simplificar e inferir los datos existentes. Por nada del mundo se trata de inventar datos ficticios. Asimismo, si fueran necesario algunos datos que no están en el problema operativo, es el punto donde se puede adicionar estos datos.

En el ejemplo E-1, los datos del problema serían:

Como ya es sabido es importante determinar las cantidades reales de los dos solventes a producir para maximizar las ganancias corporativas, por lo que es necesario saber:

- 1.- El número de horas de trabajo disponibles en el departamento de mezclado.
- 2.- El número de horas de trabajo disponibles en el departamento de purificación.
- 3.- La cantidad de ganancias obtenidas al producir y vender cada tipo de solventes.

Estas cantidades constituyen los datos del problema. En problemas determinísticos, se requiere conocer (u obtener) estos valores en el momento de formular el problema. Para Case Chemical estos datos son:

1.- Del departamento de mezclado, el cual tiene cinco trabajadores de tiempo completo (40 horas cada uno) y dos trabajadores de tiempo parcial (15 horas cada uno). Esto da un total de 230 horas de trabajo a la semana en el departamento de mezclado.

2.- Del departamento de purificación, los seis trabajadores de tiempo completo (40 horas cada uno) y el trabajador de tiempo parcial (10 horas) representan un total de 250 horas de trabajo a la semana en el departamento de purificación.

3.- Del departamento de contabilidad se estima un margen de ganancias de \$0.30 por galón de CS1 y de \$0.50 por galón de CS2, esto es, \$300 por los mil galones de CS1 y \$500 por mil galones de CS2.

A diferencia de las variables de decisión, cuyos valores usted puede controlar, usted no puede controlar directamente los valores de los datos.

3. Identificación de la función objetivo. - Consiste en expresar el objetivo organizacional global en forma matemática usando las variables de decisión y algunos datos conocidos del problema. Esta expresión de la función objetivo generalmente se crea en etapas:

a) Establecer el objetivo en forma verbal. Para el ejemplo E-1, la expresión sería:

“Maximizar la ganancia semanal total de la producción de CS1 y CS2”

b) Donde sea adecuado descomponer el objetivo en una suma, diferencia o producto de las cantidades individuales. Para el ejemplo E-1, esta descomposición sería:

“Maximizar ganancia = (ganancias de CS1) + (ganancias de CS2)”.

- c) Expresar las cantidades individuales matemáticamente, para ello utilice las variables de decisión y otros datos conocidos del problema. Para el ejemplo E-1, la expresión matemática sería:

Para ello, se elegirá algunos valores específicos para las variables de decisión y luego usar esos valores para determinar la forma en que se calcula la función objetivo.

Supongamos que se producen 10 mil galones de CS1 y 20 mil galones de CS2 (así que $CS1 = 10$ y $CS2 = 20$). El departamento de contabilidad le ha dicho que cada mil galones de CS1 contribuye con \$300 a la ganancia y que cada mil galones de CS2 contribuye con \$500, lo cual se puede escribir de la siguiente manera:

$$\text{Ganancia de CS1} = 300(10) = \$3,000 + \text{Ganancia de CS2} = 500(20) = \$10,000$$

$$\text{Ganancia total} = \$13,000$$

Sin embargo, el propósito de usar valores específicos para las variables no es obtener la ganancia total de estos valores, sino más bien ayudarlo a determinar cómo calcular el objetivo cuando los valores de las variables no se conocen explícitamente. En este problema, se puede ver fácilmente de los cálculos anteriores que, si CS1 es el número no especificado de miles de galones de CS1 y CS2 es el número no especificado de miles de galones de CS2 por producir, entonces la ganancia es:

$$\text{Ganancia de CS1} = 300CS1 + \text{Ganancia de CS2} = 500CS2.$$

Por lo tanto, la función objetiva matemática expresada en términos de las variables de decisión y de los datos del problema es:

$$\text{Maximizar:} \quad 300CS1 + 500CS2$$

4. Identificación de las restricciones. - Si su objetivo sería maximizar la ganancia, pues de acuerdo a la función objetivo la ganancia sería más grande mientras más altos

sean los valores de las variables de decisión. Pero el mundo real pone un límite en los valores que se puede asignar a las variables de decisión.

Así pues, las restricciones son condiciones que las variables de decisión deben satisfacer para constituir una solución aceptable. Estas restricciones por lo general surgen de:

- a. Limitaciones físicas (que tienen que ver con la capacidad máxima, tiempo de trabajo, rendimiento y otros).
- b. Restricciones impuestas por la administración (que tienen que ver con la demanda de algún producto producido, así como sus condiciones finales).
- c. Restricciones externas (que tienen que ver con el mercado, política y otros).
- d. Relaciones implicadas entre variables.
- e. Restricciones lógicas sobre variables individuales (que tienen que ver con el sentido común de la realidad como no producir una cantidad negativa de productos y otros)

En el ejemplo E-1, las restricciones serían:

a) Restricción de trabajo en el departamento de mezclado (limitación física):

Forma verbal: Horas totales usadas en el mezclado no pueden exceder de 230 horas

Descomposición: Horas usadas @ para CS1 + horas usadas @ para CS2 no pueden exceder de 230.

Matemáticas: Para expresar las horas usadas para CS1 y CS2 en el departamento de mezclado trate de trabajar con un ejemplo específico. Por ejemplo, suponga que CS1 =15 mil y que CS2 =10 mil galones. ¿Cómo calcula el número de horas usadas en el departamento de mezclado? Para ello tome en cuenta el tiempo de cada solvente en cada departamento:

Tabla 2.1.: Datos del tiempo de mezclado y purificado.

Departamento de:	Horas por miles de galones de:	
	CS1	CS2
Mezclado	2	1
Purificación	1	2

Fuente: (Mathur y Solow, 1996).

Resulta entonces fácil calcular las horas usadas en el departamento de mezclado trabajando con valores específicos de CS1 = 15 y CS2= 10:

$$\text{Horas para 15 mil galones de CS1} = 2(15) = 30$$

$$+ \text{Horas para 10 mil galones de CS2} = 1(10) = 10$$

$$\text{Total de horas en el mezclado} = 2(15) + 1(10) = 40$$

El propósito de usar este ejemplo numérico específico es ayudarlo a escribir una restricción matemática general cuando los valores de las variables (CS1 y CS2, en este caso) no se conocen. De los cálculos anteriores, usted obtiene la siguiente restricción matemática general:

$$2CS1 + 1CS2 \leq 230$$

b) Restricción de trabajo en el departamento de purificación (limitación física):

Forma verbal: Horas totales usadas no pueden exceder de 250 en la purificación

Descomposición: Horas usadas @ para CS1 + horas usadas @ para CS2 no pueden exceder de 250.

Matemáticas: $1CS1 + 2CS2 \leq 250$

c) Restricción de límite (limitación externa):

La limitación de que a lo más pueden venderse 120 mil galones de CS2 da pie a la siguiente restricción sobre el valor de CS2:

$$CS2 \leq 120$$

d) *Restricción de no negatividad (limitaciones lógicas):*

Claro está que usted sabe que los valores de estas variables de decisión deben ser no negativos, esto es, cero o positivos. Tales restricciones implícitas de las que usted está consciente deben hacerse explícitas en la formulación matemática. Para este problema, debe incluir las siguientes restricciones.

$$CS1 \geq 0 \text{ y } CS2 \geq 0 \text{ o } CS1, CS2 \geq 0$$

5. Formulación matemática del problema. - Consiste en resumir todo lo hecho en los apartados del 1 al 4, de tal manera que todo el modelo matemático que expresado.

En el ejemplo E-1, la formulación matemática sería:

$$\text{Maximizar: } 300CS1 + 500CS2 \text{ (ganancia)}$$

Condicionado por:

$$2CS1 + 1CS2 \leq 230 \text{ (mezclado)}$$

$$1CS1 + 2CS2 < 250 \text{ (purificación)}$$

$$CS2 < 120 \text{ (limitado en CS-02)}$$

$$CS1, CS2 \geq 0 \text{ (no negatividad)}$$

Donde:

CS1, = el número de miles de galones de CS-01 por producir semanalmente

CS2 = el número de miles de galones de CS-02 por producir semanalmente

C. Resolución del modelo matemático.

Para resolver el modelo matemático diseñado, existen algunas técnicas manuales; no obstante, en esta era de la cibernética, el uso de softwares mediante la programación lineal es el medio más utilizado. Existen varios softwares capaces de resolver modelos matemáticos, entre los más clásicos tenemos al STORM, LINDO, WINQSB, y por supuesto el SOLVER de MS Excel.

La herramienta Solver de Excel, requiere de una programación simple y amigable donde el modelo matemático es digitado en un hoja Excel para ser resuelta por la herramienta Solver. Véase las siguientes imágenes:

	A	B	C	D	E	F	G
1	PLANEACION DE LA PRODUCCION DEL SINDICATO MINERO PACOCOCHA						
2							
3	FUNCION O.	\$18,446.15					
4		126.9	328.71				
5		Xc	Xm				
6		63.33333333	31.66666667		RHS	Valor Actual	
7	R1	1	1	<=	95	95	
8	R2	-1	5	>=	0	95	
9	R3	-1	2	<=	0	0	
10							

Figura 2.6: Vista del modelo matemático digitado en una hoja de Excel.

Fuente: (Cuentas, 2012).

14	Celda objetivo (Máx.)					
15	Celda	Nombre	Valor original	Valor final		
16	\$B\$3	FUNCION O.	\$0.00	\$18,446.15		
17						
18						
19	Celdas de variables					
20	Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero	
21	\$B\$6	Xc	0	63.33333333	Continuar	
22	\$C\$6	Xm	0	31.66666667	Continuar	
23						
24						
25	Restricciones					
26	Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
27	\$F\$7	<= Valor Actual	95	\$F\$7<=\$E\$7	Vinculante	0
28	\$F\$8	>= Valor Actual	95	\$F\$8>=\$E\$8	No vinculante	95
29	\$F\$9	<= Valor Actual	0	\$F\$9<=\$E\$9	Vinculante	0
30						

Figura 2.7: Vista de la hoja de respuestas en Excel.

Fuente: (Cuentas, 2012).

D. Implementación de la solución y validación.

Es quizá el paso más importante de la metodología de la investigación de operaciones, ya que dentro del plano real se verá la efectividad de la solución determinada con el modelo matemático.

En el campo minero y en el marco de este estudio, la implementación de la solución tiene el siguiente proceso:

a) El diseño del plan de minado:

Conforme a Morales (2011), diseñar el plan de minado en base a la solución del modelo matemático es realizar un plan de trabajo que pueda guiar y dirigir a las operaciones de minado para el cumplimiento de la solución. El diseño de minado se compone de:

- **Los objetivos operacionales.** - Son las metas de producción de mineral y desmonte en un periodo de un mes. Contempla resumidamente el tonelaje total, la ley de cada zona participante si hubiera múltiples frentes de minado. También tiene en cuenta el desmonte a remover.
- **El diseño operativo.** - Para realizar un diseño operativo se utiliza softwares operativos como MineSight, que son paquetes muy complejos y con mucha aplicabilidad. En este se diseña los polígonos de mineral y desmonte, se estima su tonelaje y ley, se diseña mallas de voladura, se diseña vías de acceso, se simula la secuencia de llenado de botaderos y pads de lixiviación, así como el transporte de material. Véase la siguiente imagen:

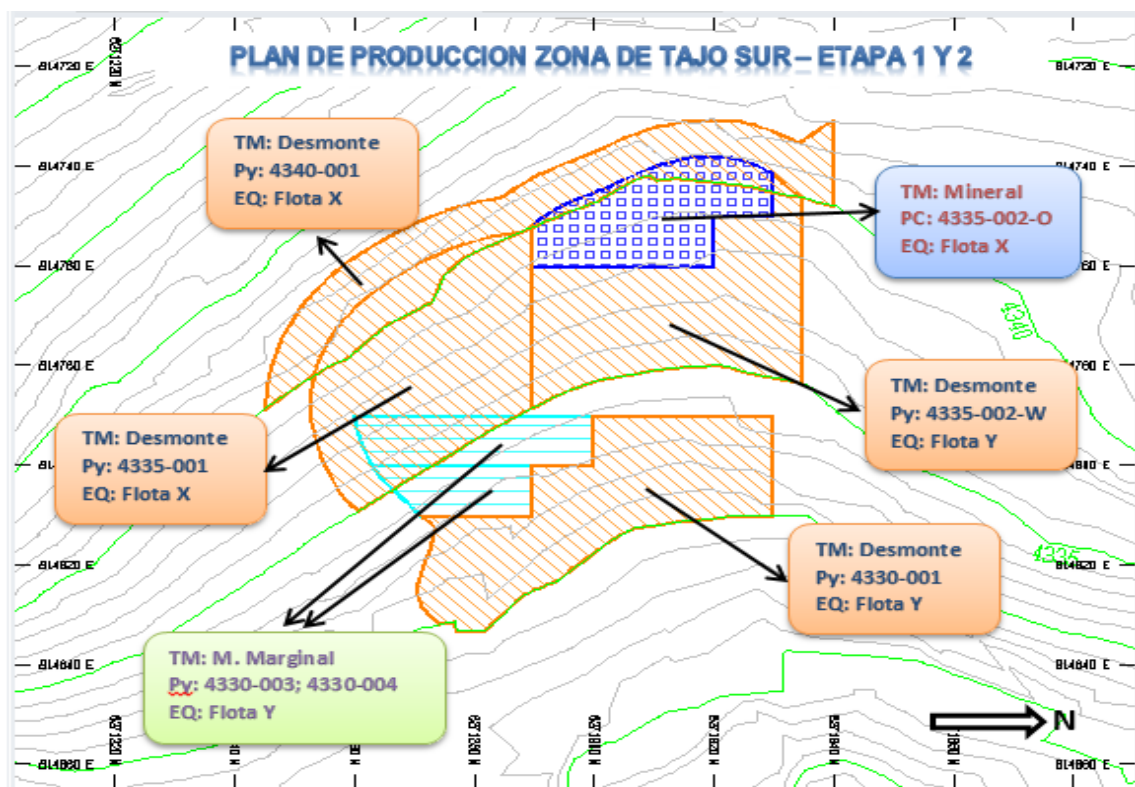


Figura 2.8: Síntesis de un plan de minado mensual.

Fuente: MineSight.

- **Expedición de reportes.** - El plan de minado comprende muchas áreas, por lo que el programa, datos, informes, resúmenes, planos y otros; deben expedirse

en documentos adecuados para que las demás áreas involucradas estén informadas sobre las acciones que deben tomar. Véase la siguiente imagen:

Destination	Production Source	Period	Cut Name	Cut Plane	Tonnes Total	
Mill		Opening Balance			0.00	
	PH01-Center	Jan_wk01	4315-001	Level 4315	3,492.49	
			4310-002	Level 4310	3,526.06	
			4310-001	Level 4310	4,432.02	
		Jan_wk01 Total				11,450.57
		Jan_wk02	4315-003	Level 4315	3,515.38	
			4315-002	Level 4315	3,553.85	
		Jan_wk02 Total				7,069.23
		Jan_wk03	4320-001	Level 4320	4,592.21	
		PH01-Center Total				23,112.01

Figura 2.9: Reporte de reservas por destino, zona, periodo y polígono.

Fuente: MineSight.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Project: 4310-001						
2	TyM: Ore						
3	Period: Week 01 - January						
4							
5	Number of holes:		53				
6	Total length drilled:		269.06				
7	Average length:		5.08				
8	Top surface area:		164.49				
9	Blasthole volume:		816.08				
10							
11	ID	EAST	NORTH	ELEV	LENGTH	AZ	DIP
12	1	314747.5	8271810	4314.69	5.19	0	-90
13	2	314749.5	8271810	4314.38	4.88	0	-90
14	3	314751.5	8271810	4314.28	4.78	0	-90
15	4	314753.5	8271810	4314.13	4.63	0	-90
16	5	314778.5	8271808	4314.23	4.73	0	-90
17	6	314776.5	8271808	4314.21	4.71	0	-90
18	7	314774.5	8271808	4314.21	4.71	0	-90
19	8	314772.5	8271808	4314.37	4.87	0	-90
20	9	314770.5	8271808	4314.5	5	0	-90

Figura 2.10: Archivo de un diseño de malla xx.csv para programas de voladura.

Fuente: MineSight.

- **Control de ejecución.** - Implica el uso del Diagrama de Gantt para el control del plan de minado. Este, al ser una secuencia de tareas que deben ejecutarse en un periodo de un mes, deben ser medidos y controlados para que los objetivos operacionales al fin del mes puedan cumplirse.

El diagrama de Gantt proporciona el nivel dinámico que necesita plan de minado, así como también permite estimar el costo total mensual; no obstante, su programación debe ser lo más simple posible para evitar todo tipo de confusiones. Muchos softwares como MineSight tienen packs que incluyen al diagrama de Gantt, pero el MS Project también es una alternativa con mejor aceptación por ser más accesible. Véase la siguiente imagen:

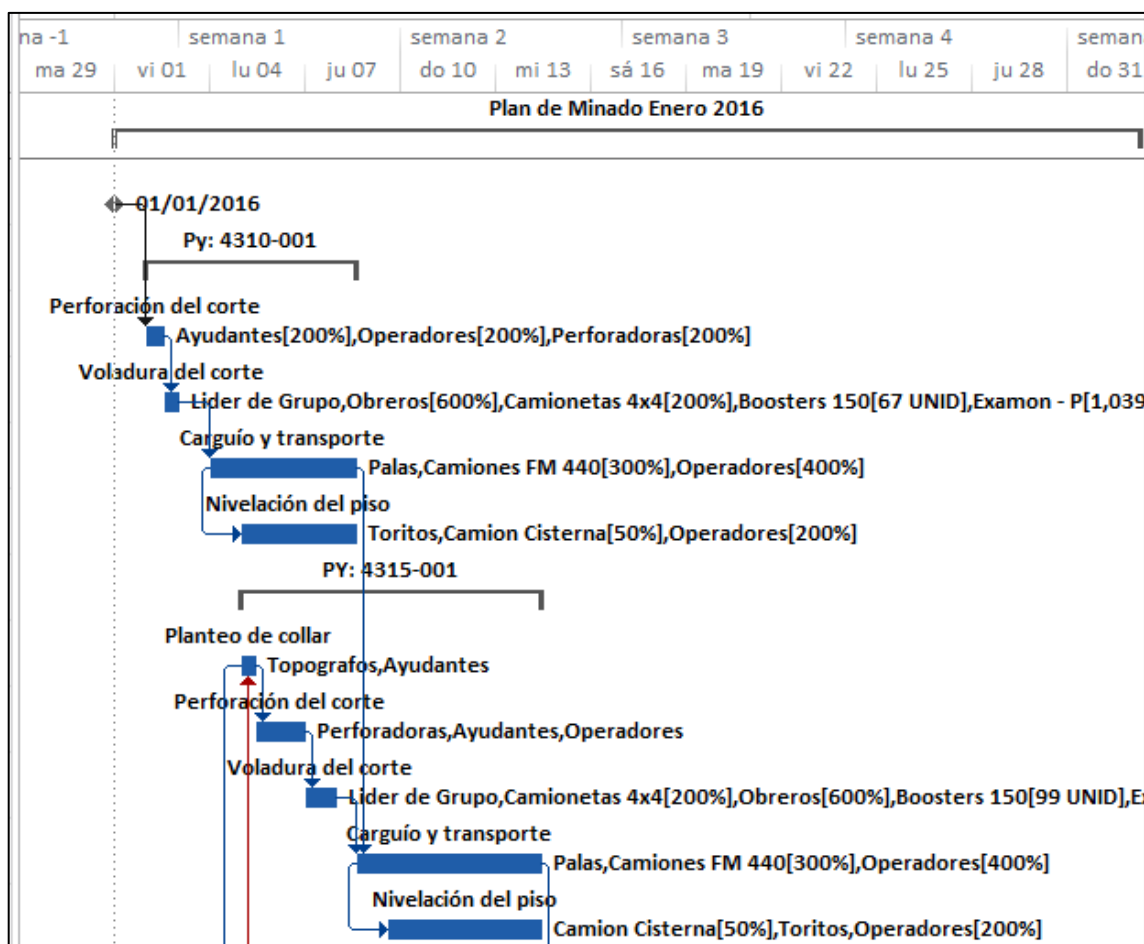


Figura 2.11: Vista del diagrama de Gantt para un plan de minado.

Fuente: MS Project.

b) Las operaciones de minado:

De acuerdo a Bustillo y López (1997), las operaciones de minado deben ejecutar y dar cumplimiento de los lineamientos del plan de minado. Esto se realiza en el día a día dentro de la faena de una cantera no metálica o cualquier operación minera. Dentro de las operaciones de minado se tendrá el tonelaje de mineral y desmonte realmente extraído, así como la ley de mineral obtenida, el costo operativo incurrido, el avance real y otros. Siendo estos valores muy distintos a los proyectados en el plan de minado.

c) Validación:

Según refiere Cuentas (2012), por lo general, siempre ha existido un desfase entre lo programado vs lo ejecutado; siendo los valores programados el plan de minado, y los valores obtenidos la operación de minado. En el contexto de la investigación de operaciones, el plan de minado ha sido el diseño gráfico – analítico de la solución del modelo matemático; mientras que las operaciones de minado la ejecución de la solución del modelo matemático. Si al final el balance fuera malo o adverso, entonces la solución del modelo matemático no resulto a satisfacción el problema, por lo que será necesario: Replantear el modelo matemático. Pero, si el balance bueno, entonces la solución del modelo matemático será apta para continuar hasta que las condiciones de la operación u otras cambien. Véase las siguientes imágenes:

Producción del Mes - Programado							
	MToneladas	Ley Cu%	Ley Mo%	OxCu	Fe	% I.S.	WI
Mineral a concentradora	1,699	0.668	0.031	0.014	3.562	13.494	16.15
Mineral lixiviable	7,739	0.183	0.003	0.01	5.214	19.709	-
Desmonte	9,009	0.037	-	-	-	-	-
Total material	18,447						
Factor desbroce	9.85						

Figura 2.12: Vista del tonelaje de material y ley programado.

Fuente: Mina Toquepala.

Producción Mensual - Oficial							
	MToneladas	Ley Cu%	Ley Mo%	OxCu	Fe	% I.S.	WI
Mineral a concentradora	1,858	0.667	0.031	0.016	3.825	16.454	16.04
Mineral lixiviable	7,235	0.175	0.003	0.009	5.385	24.385	-
Desmante	11,003	0.034	-	-	-	-	-
Total material	20,096						
Factor desbroce	9.81						

Figura 2.13: Vista del tonelaje de material y ley ejecutado – logrado/oficial.

Fuente: Mina Toquepala.

Según las figuras 2.12 y 2.13, el balance entre el mineral y su ley programado versus la mineral obtenido/oficial es positivo y bastante bueno, por lo que, la operación de minado es eficaz en la ejecución de faenas y cumplimiento de objetivo.

2.3. Softwares utilizados:

Los softwares que se utilizan en esta investigación son:

2.3.1. MS Excel – Solver.

Es una herramienta avanzada de MS Excel, el cual se usará en este estudio para resolver el modelo matemático, determinando la función objetivo y el valor de las variables en cuanto a tonelaje y ley de la roca caliza a extraerse de cada zona de la Cantera Ayacucho cumpliéndose todas las restricciones.

Para activar la herramienta Solver, es necesario ir al menú Archivo/ y hacer clic en “opciones”. Se activará la venta “Opciones de Excel”, dirijase al apartado Complementos y haga clic en el botón “Ir...” que está al lado de “administrar”. Véase la siguiente imagen:

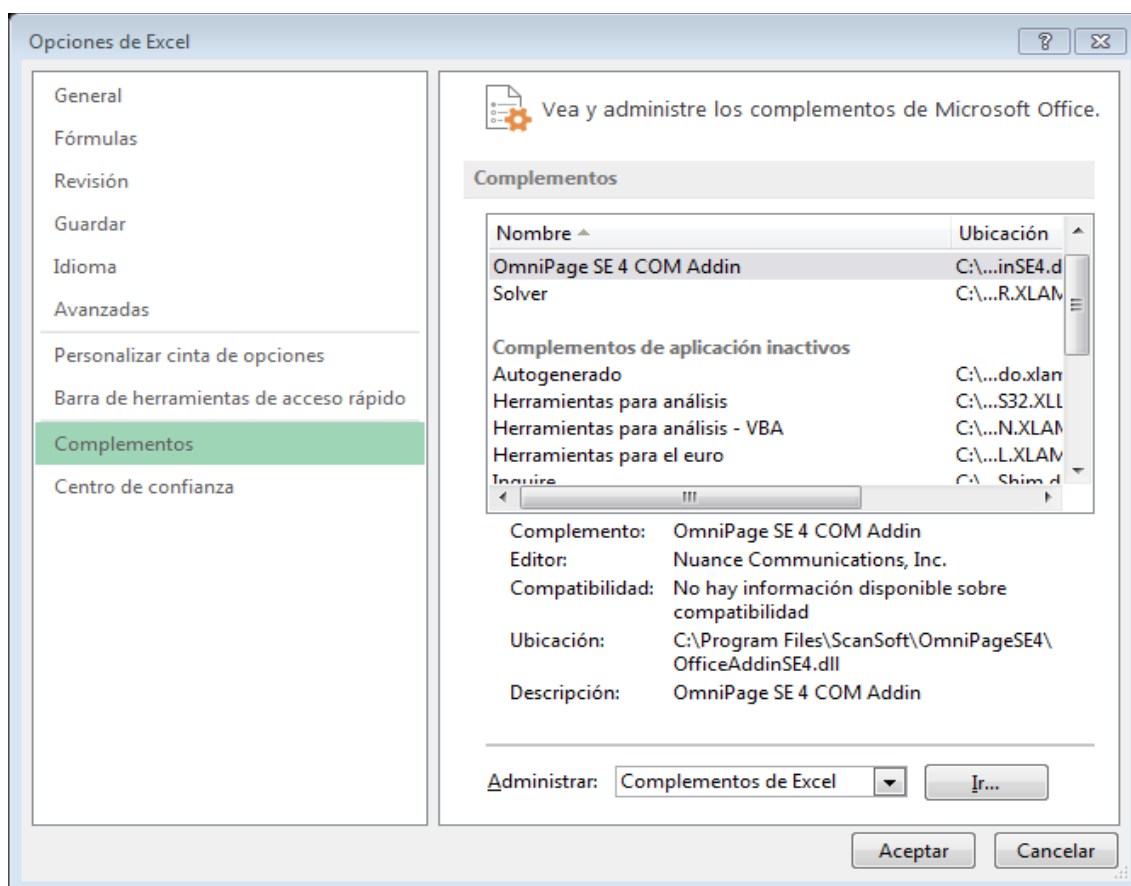


Figura 2.14: Vista de la ventana de Opciones de Excel.

Fuente: MS Excel.

Finalmente, aparecerá la ventana “Complemento”. Haga check en la opción “Solver” y haga clic en el botón “Aceptar”. Entonces la herramienta Solver quedará activada en el menú Datos.

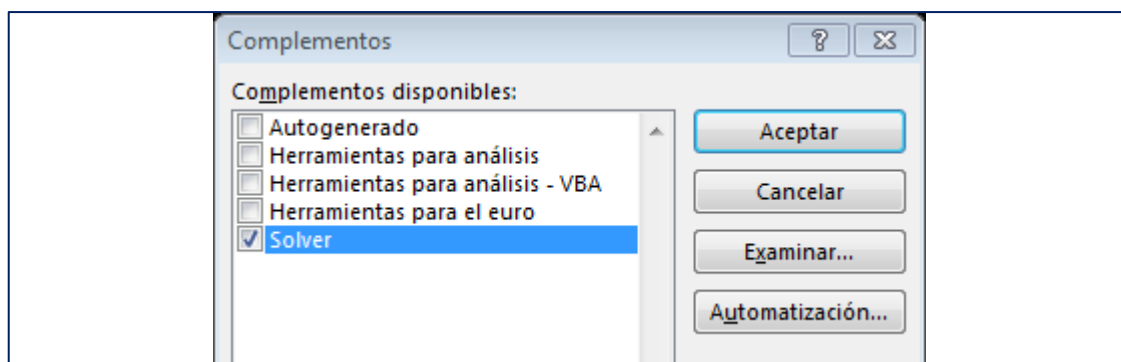


Figura 2.15: Vista de la ventana de Complementos.

Fuente: MS Excel.

2.3.2. Hexagon - MineSight.

El MineSight es un software muy completo y muchas aplicaciones, no obstante, este software sólo se usará para visualizar la implementación de la solución del modelo matemático de la Cantera Ayacucho en el plan de minado mensual, que a su vez se llevara a cabo en la operación minado de la extracción de la caliza en Cal y Cementos Sur – Caracoto.

2.4. Formulación de la hipótesis:

2.4.1. Hipótesis general.

Extrayendo roca caliza de la zona 3 de la Cantera Ayacucho se optimiza la rentabilidad operativa de la cal en Cal y Cementos Sur - Caracoto.

2.4.2. Hipótesis específicas.

- a. Extrayendo un tonelaje y una ley óptima de la roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho se maximiza la rentabilidad operativa de la cal.
- b. Minando roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho se mejora la recuperación metalúrgica de la cal y el incremento de costos de minado es mínimo.
- c. La rentabilidad operativa de la cal se optimiza al procesar mineral de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur – Caracoto.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico:

3.1.1. Tipo de investigación.

Esta investigación fue de tipo explicativo y aplicativo. Es explicativo, ya que mediante la elaboración de un modelo matemático tipo determinístico se determinó un tonelaje y una ley óptima de caliza kárstica, negra y margosa que se debía de minar de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho; y el cual maximizaba la rentabilidad operativa de la cal (balance costos de minado y el beneficio de venta de la cal con mejor recuperación metalúrgica). Es aplicativo, pues una vez determinado el tonelaje y ley óptima de roca caliza a minarse de cada zona de la cantera Ayacucho, esta solución fue implementada en la producción de caliza de Cal y Cementos Sur – Caracoto, ello con la finalidad de optimizar la rentabilidad operativa de cal en un balance real de costo – beneficio. Cabe mencionar que para medir la optimización de la rentabilidad operativa obtenida al minar roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho, este se hizo una comparación con la línea de base que era la rentabilidad operativa cuando sólo se extraía roca caliza de la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho.

3.1.2. Alcance.

El alcance de esta investigación fue correlacional, pues se midió la causa y el efecto; siendo la causa, el minado de un determinado tonelaje y ley de roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho con cierto costo operativo asociado; sobre el efecto, el cual

fue la rentabilidad operativa obtenida de la cal tras minar roca caliza determinado en la causa.

3.1.3. Diseño de la investigación.

El diseño de esta investigación fue de tipo experimental, y se desarrolló de la siguiente manera:

Primero: Se construyó un modelo matemático tipo determinístico, este modelo matemático tuvo en cuenta todos los datos involucrados en la rentabilidad operativa de la cal; estos datos eran: los costos de minado de cada zona de la Cantera Ayacucho, la ley promedio de la caliza kárstica, masiva negra, y margosa de la zona 1, 2 y 3; el tonelaje mensual máximo a procesar por la planta, la ley de cabeza y el valor de venta de la cal.

Segundo: Se resolvió el modelo matemático con la ayuda de Solver – Excel, esto con la finalidad de determinar un tonelaje y una ley óptima que tenía que minarse de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho para maximizar la rentabilidad operativa de la cal.

Tercero: Se implementó la solución del modelo en las operaciones de minado para verificar los costos reales y la recuperación metalúrgica real obtenida; esto fue importante para el estudio pues validó la solución del modelo matemático en las operaciones de extracción de la roca caliza en la cantera Ayacucho.

Cuarto: Se evaluó la rentabilidad operativa de la cal de al minar roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho comparándolo con la rentabilidad operativa de la cal cuando sólo se minaba roca caliza de la zona 1 y 2 de la cantera. Esta comparación dio como resultado una optimización de la rentabilidad de la cal en Cal y Cementos Sur – Caracoto.

3.2. Población y muestra:

3.2.1. La población.

La población para el presente estudio de investigación fueron las áreas de: Operaciones de minado de la Cantera Ayacucho, geología, planeamiento y procesamiento/planta de Cal y Cementos Sur S.A. De estas tres áreas se recopilieron datos correspondientes a los meses de junio, julio, agosto y septiembre del año 2018 como parte de su línea de base; y datos de los meses de octubre, noviembre y diciembre del año 2019, así como enero del 2019 como parte de la experimentación.

3.2.2. Las muestras.

Las muestras recolectadas corresponden a las tres áreas de la población que se usaran para la construcción del modelo matemático, así como para evaluación y validación de la rentabilidad de la cal. Estos datos recolectados se organizaron de la siguiente manera:

3.2.2.1. Área de geología.

Esta área ha proporcionado las reservas de caliza tipo kárstica, masiva negra y margosa que pueden minarse de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho. Cada zona tiene sus propias características físicas, topográficas y también geológicas.

a. La zona 1: Es una zona más concentrada y está muy cerca de la zona de pilas, teniendo poca distancia de transporte. No obstante, la caliza kárstica ha sido minada en su totalidad, por lo que solo queda la caliza masiva negra predominantemente y muy poca presencia caliza margosa. En la figura 3.1, la zona 1 esta englobado por una línea negra con cuerpos geológicos de color azul.

b. La zona 2: Es una zona un tanto dispersa con mayor distancia de la zona de pilas. Posee en reserva los tres tipos de caliza, pero la caliza margosa tiene muy poca presencia y está muy asociada a los otros tipos de caliza. En la figura 3.1, la zona 2 esta englobado por una línea verde con cuerpos geológicos de color celeste.

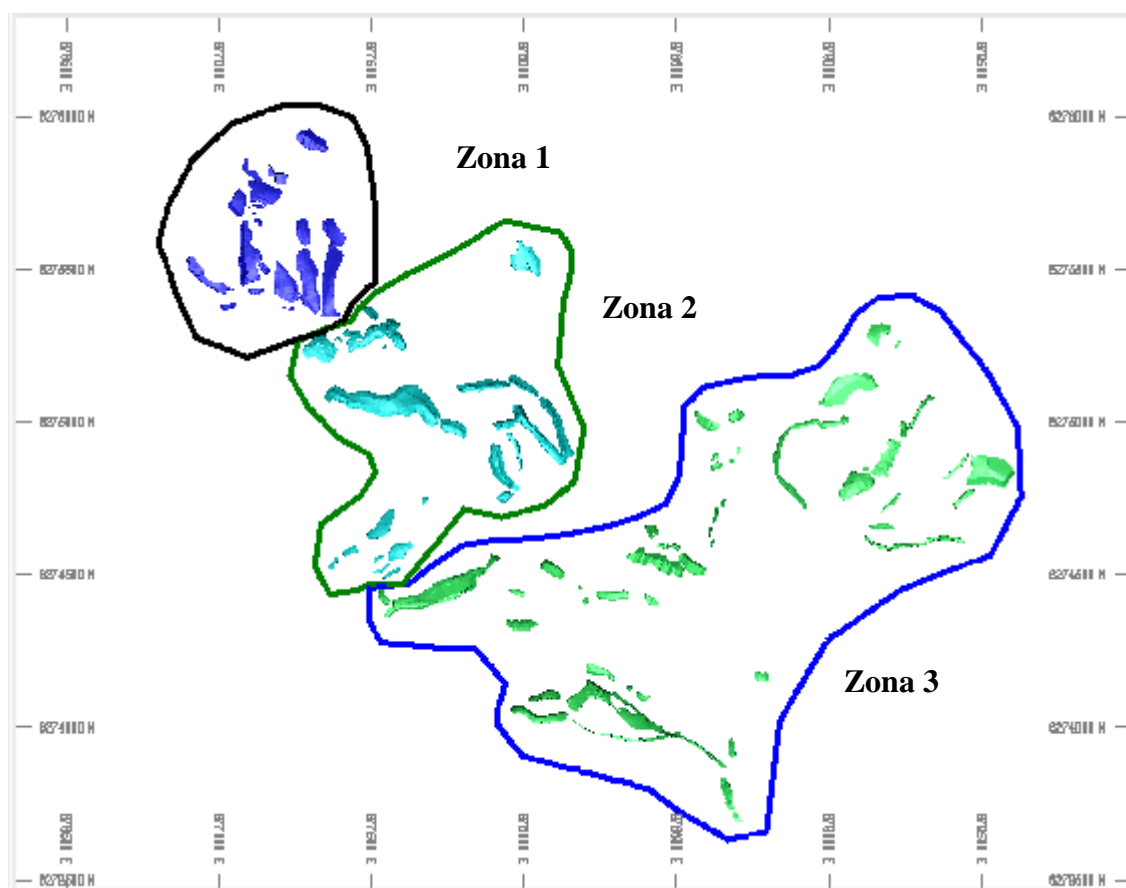


Figura 3.1: Vista de la distribución topográfica de las 3 zonas de minado de la Cantera Ayacucho.

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

c. La zona 3: Es la zona con mayor dispersión y con mayor distancia de la zona de pilas. Posee en reserva los tres tipos de caliza, no obstante, por el momento sólo se minara la caliza tipo kárstica. En la figura 3.1, la zona 3 esta englobado por una línea azul con cuerpos geológicos de color verde.

En resumen, cada zona es particular teniendo también diferentes reservas de roca caliza, las cuales se pueden apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 3.1.: Reservas seleccionadas por zonas de la cantera Ayacucho.

Cantera Ayacucho	Roca caliza	Código de roca	Mineral TM	Ley %CaCO3
Zona 1	Masiva Negra	2	894,625	49.52
Zona 2	Kárstica, Masiva N.	1 y 2	1,755,981	51.36
Zona 3	Kárstica	1	1,728,947	53.28

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

3.2.2.2. Área de operaciones de minado.

Esta área ha proporcionado principalmente los costos de minado de cada zona dentro de la cantera Ayacucho. De forma sintetizada, estos costos se organizan por cada operación unitaria:

A: Perforación:

Los costos de perforación de la zona 1 y 2, son costos históricos que se ha tenido antes de la inclusión de la zona 3. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.2.: Costo de perforación e índices operacionales de la zona 1 y 2.

	Nº de Equipos IR 605:	1.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	80%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Toneladas de Mineral (TM/mes):	39,900.00
	Mts Barrenados por mes:	5,047.65
	Costo - MP (US\$/m):	4.16
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.53

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

En cuanto a los costos de perforación de la zona 3, son costos proyectados. Cabe recalcar que antes de la inclusión de la zona 3, solo se usaba 1 perforadora, pero con la zona 3 es necesario incluir 1 perforadora más, por lo que el costo de perforación se incrementó en un 100%. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.3.: Costo de perforación e índices operacionales de la zona 3.

	N° de Equipos IR 605:	1.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	80%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Toneladas de Mineral (TM/mes):	26,600.00
	Mts Barrenados por mes:	3,365.10
	<i>Costo - MP (US\$/m):</i>	4.16
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.53

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

B: Voladura:

Los costos de voladura son costos históricos y no tendrán ningún incremento por la inclusión de la zona 3. Sin embargo, la zona 3 si impactara sobre los servicios auxiliares que en voladura utiliza camionetas acondicionadas (furgonetas) para el transporte de personal y los explosivos. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.4.: Costo de voladura integra de las tres zonas de minado.

	Malla Triangular Equilatera	
	Burden (m):	1.73
	Espaciamiento (m):	2.00
	Longitud taladro (m):	5.50
	Costo total explosivo US\$/tal:	19.63
	Toneladas Rotas (TR):	43.47
	<i>Factor de Carga:</i>	0.36
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.45

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

C: Carguío:

Los costos de carguío de la zona 1 y 2, son costos proyectados sin análisis de MS-Haulage y basados en los costos históricos que se ha tenido antes de la inclusión de la zona 3. Véase las siguientes tablas:

Tabla 3.5.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 1.

	N° de CAT 336D L (Pala -1):	1.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	90%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Toneladas de Mineral (TM/mes):	22,539.52
	Capacidad de balde (m3):	2.50
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	<i>108.60</i>
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.61

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

Tabla 3.6.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 2.

	N° de CAT 938 M (Car - 1):	1.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	85%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Toneladas de Mineral (TM/mes):	24,510.00
	Capacidad de balde (m3):	3.00
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	<i>135.23</i>
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.86

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

En cuanto a los costos de carguío de la zona 3, son costos proyectados que tampoco tiene el análisis de MS-Haulage. Cabe mencionar que del Car -1 a la zona 3, ha incrementado su costo base en 6.25%, es decir de 0.80 US\$/TM a 0.85 US\$/TM. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.7.: Costo de carguío e índices operacionales en la zona 3.

	N° de CAT 950 M (Car - 2):	1.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	80%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Toneladas de Mineral (TM/mes):	27,360.00
	Capacidad de balde (m3):	4.00
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	<i>166.87</i>
	Costo por tonelada (US\$/TM):	0.85

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

D: Transporte:

Los costos de transporte de la zona 1 y 2, también son costos proyectados sin análisis de MS-Haulage y basados en los costos históricos que se ha tenido antes de la inclusión de la zona 3. Es importante mencionar que estas zonas aún utilizan los camiones Volvo FM-440. Véase las siguientes tablas:

Tabla 3.8.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 1.

	N° de Volvos FM 440:	3.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	90%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Distancia total (Km):	3.127
	Capacidad de balde (m3):	15.00
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	78.37
	Costo por tonenlada (US\$/TM):	1.58

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

Tabla 3.9.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 2.

	N° de Volvos FM 440:	3.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	90%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Distancia total (Km):	3.750
	Capacidad de balde (m3):	15.00
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	78.37
	Costo por tonenlada (US\$/TM):	1.81

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

En cuanto a los costos de transporte de la zona 3, son costos proyectados que tampoco tiene el análisis de MS-Haulage. En la zona 3 se cambió el uso de los FM-440 por los Mercedes Benz Actros de 17 m³, lo cual incrementó el costo base en 13.81%, es decir de 1.81 US\$/TM a 2.06 US\$/TM. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.10.: Costo de transporte e índices operacionales en la zona 3.

	N° de Mercedes Benz Actros:	4.00
	Disponibilidad mecánica (DM%):	90%
	Utilización (UT%)	90%
	Eficiencia Operativa (EO%)	80%
	Distancia total (Km):	4.162
	Capacidad de balde (m3):	17.00
	<i>Costo horario (US\$/hr):</i>	85.22
	Costo por tonelada (US\$/TM):	2.06

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

E: Servicios auxiliares:

Los costos de los servicios auxiliares mina es el que lleva el mayor impacto en sus costos operativos por la inclusión de la zona 3. Si bien no se incrementan más equipos auxiliares, el % de utilización dentro de la cantera Ayacucho disminuye, ocasionando que tengan más horas operativas en traslado entre las distintas zonas. Por tal motivo, el costo de los servicios auxiliares mina se incrementó en un 100%, es decir, de 0.16 US\$/TM en promedio a 0.34 US\$/TM.

Estos costos de servicios auxiliares mina se distribuyen por cada zona de la siguiente manera:

- i. Zona 1: 0.067 US\$/TM.
- ii. Zona 2: 0.118 US\$/TM.
- iii. Zona 3: 0.151 US\$/TM.

3.2.2.3. Área de procesamiento/planta.

Esta área ha proporcionado algunos datos sobre el procesamiento de la caliza así como el costo operativo de planta. Véase la siguiente tabla:

Tabla 3.11.: Datos operativos y costos de procesar la roca caliza.

Roca caliza	Código de roca	Densidad	Recuperación metalúrgica (%)	Costo de Proceso (US\$/TM)
Kárstica	1	2.51	71.50%	5.40
Masiva Negra	2	2.51	71.50%	5.40

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

Asimismo, los requerimientos de entrada de mineral se tienen:

- Ley de cabeza mínima de %CaCO₃: 50.50%.
- Ley de cabeza máxima de %CaCO₃: 52.00%.

3.2.2.4. Área de planeamiento.

Esta área ha proporcionado la producción diaria, mensual y anual de mineral en planta y para el minado de la cantera Ayacucho. Asimismo, al área de planeamiento está encargado de realizar la evaluación del mineral programado en el plan de minado y el mineral cumplido por el área de operaciones. En posteriori realizará la validación, pero en este punto se verá la rentabilidad mensual antes de la inclusión de la zona 3. Véase las siguientes tablas:

Tabla 3.12.: Producción diaria, mensual y anual de mineral en planta y mina.

Producción programada		Planta		Minado + Stockpile		
Toneladas	Unidades	Mineral	Mineral	Desmonte	Total	SR (E/M)
Por día	TM/día	1,950	2,100	315	2,415	0.15
Por mes	TM/mes	60,450	65,100	9,765	74,865	0.15
Por año	TM/año	711,750	766,500	114,975	881,475	0.15

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

En la tabla 3.12, se puede apreciar que hay una diferencia entre la producción de mineral de planta y la producción de mineral de minado. La producción de mineral en planta se debe entender como una restricción física de capacidad de producción, es decir, es el tonelaje máximo que puede procesar. En cambio, la producción de mineral de

minado es más una meta pues incluye el mineral que debe procesar planta y el mineral que debe estar depositado en los stockpiles para eventualidades en planta.

Tabla 3.13.: Rentabilidad operativa de la cal antes de la inclusión de la zona 3.

Flujo de Caja Operativo	Año 2018			
	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Producción de cal				
Cotización de la Cal (US\$/TM)	232	232	232	232
Tonelaje mensual (TM/mes):	59,845.27	61,243.42	60,981.64	59,875.98
Ley promedio (%CaCO3):	51.63	51.14	52.09	51.84
Recuperación Metalúrgica (%):	63.36%	62.73%	64.02%	63.55%
Ingreso por ventas US\$:	4,541,874.3	4,558,095.6	4,717,991.0	4,576,370.4
Costos operativos				
Costo por tonelada mina (US\$/TM):	3.297	3.330	3.322	3.320
Costo por tonelada planta (US\$/TM):	5.367	5.463	5.427	5.286
Costo total (US\$):	518,469.50	538,504.82	533,513.12	515,275.92
Utilidad Operativa US\$:	4,023,404.8	4,019,590.8	4,184,477.9	4,061,094.5

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

Según la tabla 3.13, la ley promedio obtenido fue de 51.67 %CaCO3 que ha tenido una recuperación metalúrgica de 63.42%, con lo cual se ha obtenido un ingreso por venta de la cal de US\$ 4'598,582.8. Estos resultados han estado por debajo de los objetivos mensuales (target). Véase la siguiente figura:

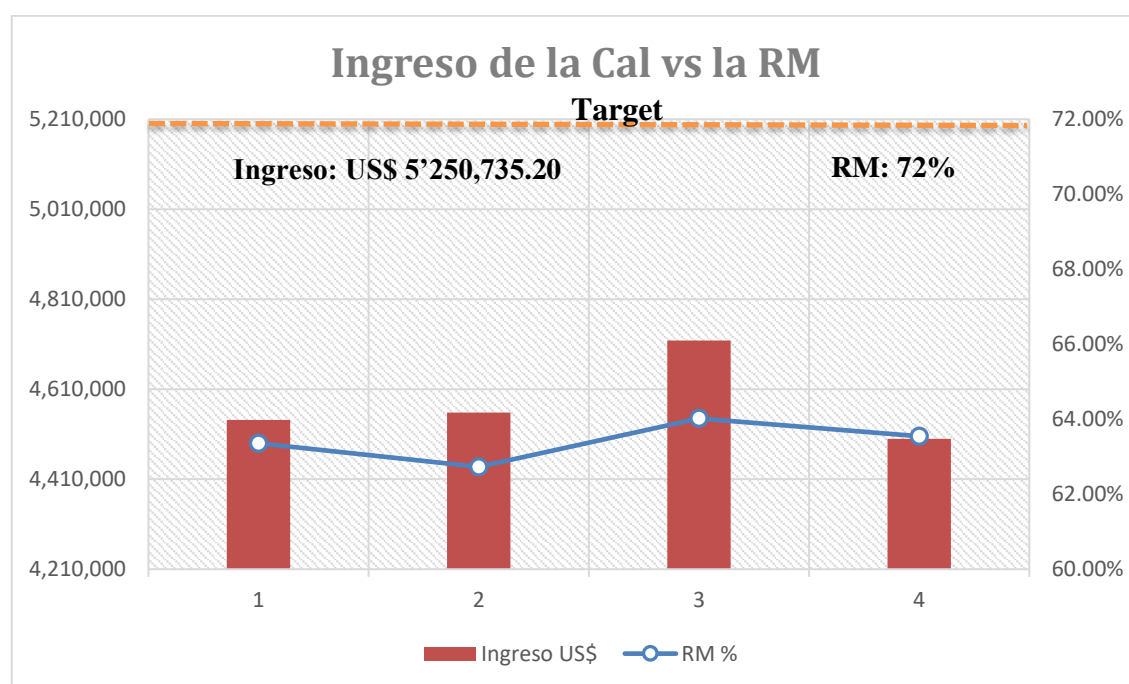


Figura 3.2: Ingreso por ventas de cal como consecuencia de la RM.

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

De acuerdo a la figura 3.2, existe una perdida por ingreso de 652,152.53 en promedio por una caída de la recuperación metalúrgica (RM) en 8.40% en promedio. A esto agregar que la ley promedio obtenido de 51.67 %CaCO₃ está por debajo de ley programada de 52.50 %CaCO₃. Todo ello, antes de incluir la producción de la zona 3.

3.3. Definición y operacionalización de variables:

Las variables de esta investigación son:

a) Variable dependiente:

La rentabilidad operativa de la Cal.

b) Variable independiente:

Un tonelaje y una ley óptima de roca caliza a ser minada de la zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho.

Bajo la premisa anterior se tiene la siguiente operacionalización de la variable independiente:

Tabla 3.14.: Operacionalización de la variable independiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICES
Un Tonelaje y Una Ley Óptima de Roca Caliza a Ser Minada de la Zona 1, 2 y 3 de la Cantera Ayacucho	Caliza Minada de la Zona 1, 2 y 3	Tonelaje de caliza kárstica	TM/mes
		Tonelaje de caliza negra	TM/mes
		Tonelaje de caliza margosa	TM/mes
	Ley de la Caliza	Ley de cabeza - mínimo y máximo	%/TM
	Costo de Minado Mensual	Costo de perforación	US\$/TM
		Costo de voladura	US\$/TM
		Costo de carguío y transporte	US\$/TM
		Servicios auxiliares mina	US\$/TM
	Recuperación Metalúrgica de la Cal	Mineral caliza procesada	TM/mes
		Recuperación mensual de la Caliza	%/mes

Fuente: Tesista.

3.4. Técnicas de recolección de datos:

La técnica de recolección de datos para este estudio se hizo de forma distinta para cada variable, esto se puede apreciar de forma esquematizada y resumida en las siguientes figuras:

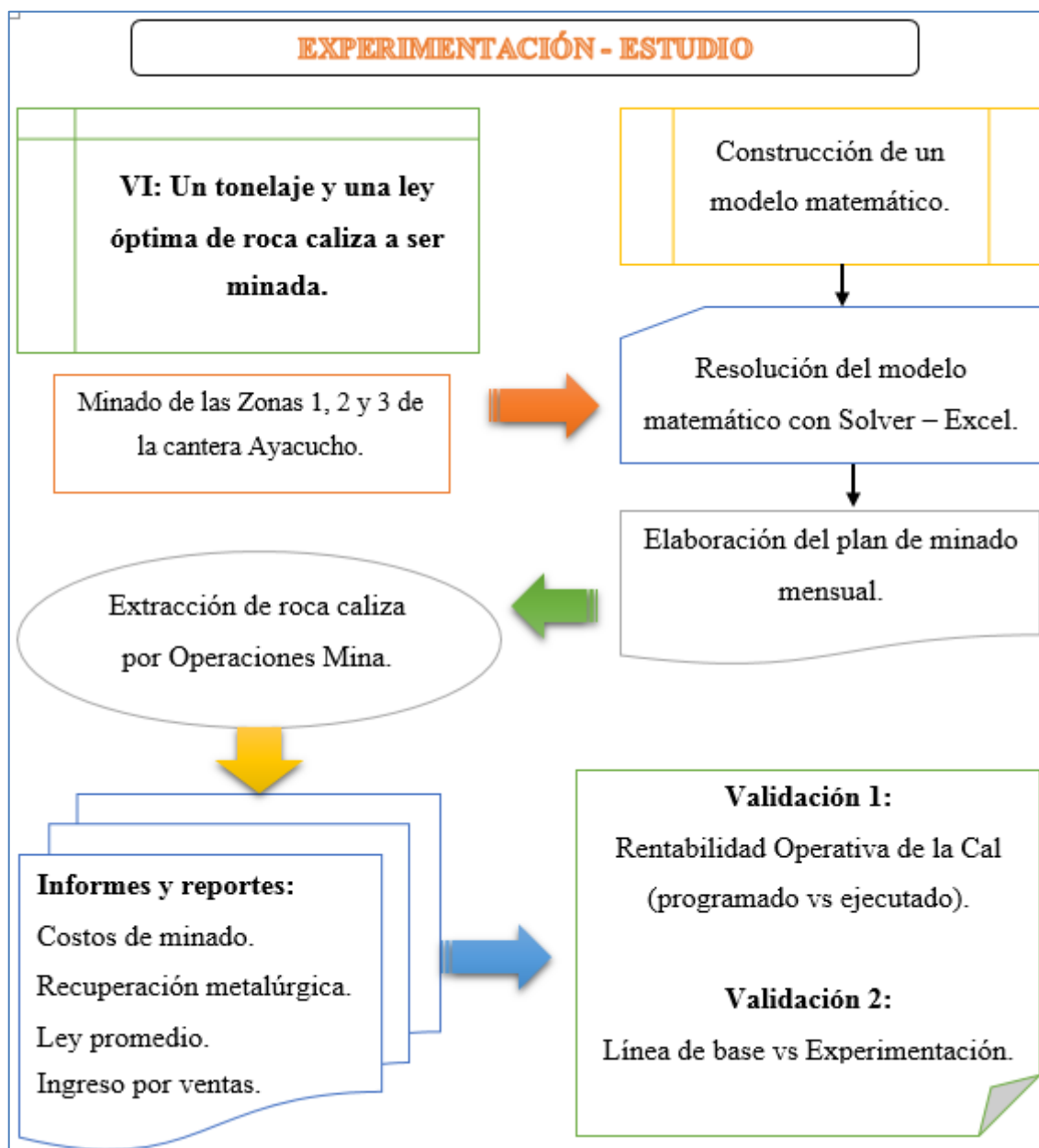


Figura 3.3: Esquema para la variable independiente – experimentación.

Fuente: Tesista.

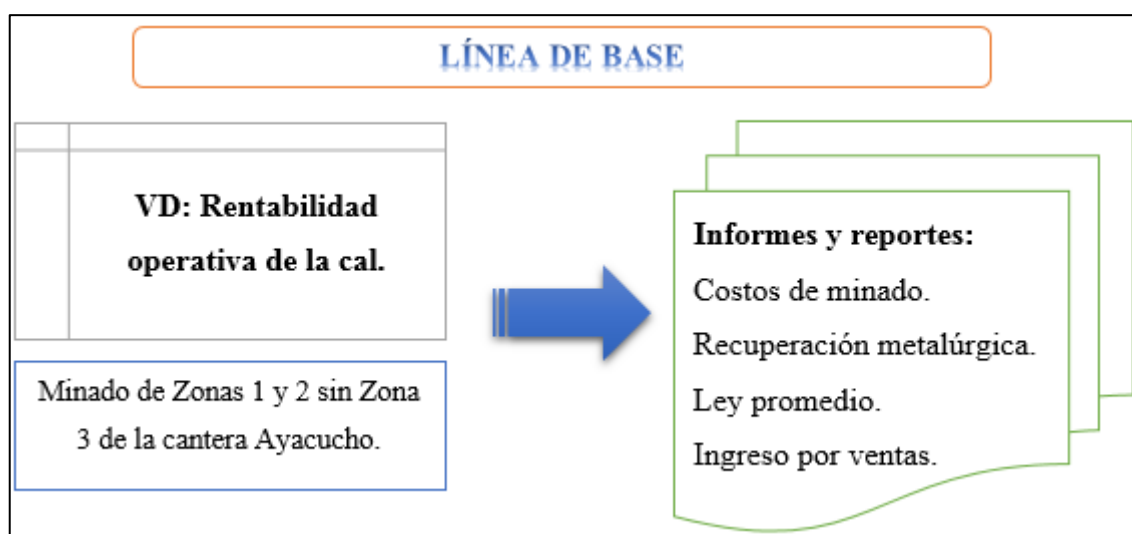


Figura 3.4: Esquema para la variable dependiente – línea de base.

Fuente: Tesista.

CAPÍTULO IV:

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Aspectos generales del área de estudio:

4.1.1. Ubicación y acceso.

Cal y Cementos Sur – Caracoto es una de las productoras de cal más grandes del país con una capacidad de 700 KTM/año y se encuentra ubicada en el distrito de Caracoto, provincia de San Román, departamento de Puno. Sus coordenadas UTM centroide es: 378,220 en este y 8'275,140 en norte, y a una altura promedio de 3,850 m.s.n.m. En el anexo N° 01 se puede ver una imagen de la ubicación de Cal y Cementos Sur – Caracoto.

Para acceder a Cal y Cementos Sur – Caracoto, este se hace por la carretera Juliaca – Puno, recorriendo 11 Km desde la ciudad de Juliaca hasta llegar al distrito de Caracoto, donde existe un tramo asfaltado de 1.5 Km para llegar a la planta, y para llegar a la Cantera Ayacucho se pasa por una trocha carrozable de 1.5 a 2 Km partiendo desde la planta.

4.1.2. Geología general.

La geología de la cantera Ayacucho – Caracoto, predominantemente se compone de la formación Ayabacas que se distribuye sobre el altiplano según una dirección SE-NO, consta mayormente de calizas grises, micríticas, de textura fina y uniforme con intercalaciones de limoarcillitas con abundante yeso, a veces en forma maciza, con brechas intraformacionales, estratos delgados intensamente replegados (melange). En el sector de Ancocollo y Challoyo se han registrado niveles carbonosos con abundantes

nódulos calcáreos y restos de tallos de plantas (típico de un ambiente restringido). Se han reconocido dos facies: una facie de calizas grises intercalada con limoarcillitas con abundante yeso y anhidrita en el sector NE del área de estudio y otra predominantemente calcárea hacia el sector NO y SE.

Las calizas que afloran en el sector de Juilalaca y Toncoyo, muy cerca de la ciudad de Acora (departamento de Puno), están intensamente replegadas probablemente debido a la influencia del “Alto Cabanillas”, que actuó como contrafuerte a los esfuerzos compresivos posteriores, ocasionando que la masa calcárea desplazada, colisionara y se replegara. También es común observarlas en contactos con las secuencias conglomeráticas del Grupo Puno (Paleogeno), sobre secuencias areniscosas y calcáreas del Grupo Maure (Mioceno) y sobre los derrames lávicos con tobas retrabajadas del Grupo Tacaza (Oligoceno). En las imágenes satelitales se observa un solapamiento preferencial de estas calizas al E y NO.

4.1.3. Planeamiento y diseño de la cantera.

Cal y Cementos Sur cuenta con 17 concesiones mineras no metálicas que equivalen a un área de 4,647 hectáreas. Desde el inicio de sus operaciones el Grupo Gloria dueño de Cal y Cementos Sur contó con más de 40'000,000 TM de reservas probadas y probables de caliza y reservas potenciales de 79'741,000 TM en sus distintas concesiones mineras. Actualmente, se está minado la zona denominada Cantera Ayacucho que cuenta con 100 hectáreas de influencia operativa y todavía tiene reservas remanentes de 5.62 millones de TM de roca caliza. Esto da un total de 7.9 años de vida remanente para la Cantera Ayacucho.

Para el diseño de la cantera Ayacucho en sus distintos pit Shell, así como sus canteras operativas (pequeños tajos) y botaderos, se ha tenido en cuenta varios parámetros, los cuales se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.1.: Parámetros de diseño de la cantera Ayacucho.

Parámetros de diseño			
Cantera y Rampas		Botaderos	
Altura de banco (m):	5.00	Altura de etapa (m):	10.00
Ancho de berma (m):	4.00	Altura máxima botadero (m):	60.00
Ángulo de talud de banco (°):	75	Ancho de berma (m):	10.00
Ancho de minado (m):	15.00	Angulo overall - botadero (°):	35
Ancho de rampa (m):	6.00	Paso etapa/berma:	2
Pendiente máxima (%):	12		
Ángulo overall - tajo (°):	43.12		

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

4.1.4. Operación de minado en la cantera Ayacucho.

La cantera Ayacucho – Caracoto extrae roca caliza en bancos operativos de 5 metros en distintas canteras (tajos pequeños) para producir principalmente Cal y comercializarlo a distintas mineras como: Chinalco, Toquepala, Cuajone y otros.

En la actualidad, la cantera Ayacucho procesa 700 KTM de mineral por año, es decir; 60,500 TM por mes y 1,950 TM por día; con una relación estéril/mineral máxima de 0.20. Hasta antes de este estudio de investigación, en la cantera Ayacucho se minaba por lo menos 60% de caliza kárstica y el resto de caliza masiva negra y margosa solamente de las zonas 1 y 2. La operación de minado en la cantera Ayacucho se realiza de la siguiente manera:

A: La perforación:

Se realizaba con una sola perforadora Track Drill – Ingersoll Rand de 3” de diámetro antes de incluir la zona 3. Pero, con la zona 3, se proyecta perforar con 2 perforadoras que operen en trazos de malla tipo triangular equilátera de 1.73 x 2.00 m principalmente en mineral.

B: La voladura:

Se realiza teniendo como explosivo base el Anfo y para taladros con agua los cartuchos de Slurries. Los accesorios empleados son: el booster, el cordón detonador, retardos de superficie y armados de mecha lenta y fulminantes simples para el encendido. Su secuencia de salida es un combinado del pirotécnico – Nonel con un carguío manual de los taladros por parte del personal de mina.

C: El carguío:

Se realiza con 2 cargadores frontales CAT de 3.5 y 4.5 m³, y 1 excavadora también CAT de 2.5 m³; los cuales han sido asignados de forma fija en diferentes pits de la zona 1 y 2. Ahora también serán asignados en la zona 3 dentro de la cantera Ayacucho.

D: El transporte:

Se realiza con 7 camiones FM-440 15 m³, y 4 camiones Mercedes Benz Actros de 17 m³. Los camiones FM-440 serán asignados a las zonas 1 y 2; mientras que los Actros a la zona 3 de la cantera Ayacucho. Estos camiones operan en un radio de 4.50 Km de distancia, siendo la distancia máxima a recorrer 5.00 Km.

4.2. Determinando con un modelo matemático el tonelaje y ley óptima de roca caliza a extraerse de la zona 1, 2 y 3:

En este punto ha de construirse el modelo matemático para luego resolverlo utilizando la herramienta Solver. Ello, con la finalidad de alcanzar el primer objetivo de este estudio, el cual es determinar el tonelaje y la ley óptima de roca caliza que se debe extraer de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho. Véase a continuación el proceso de desarrollo de este objetivo 1:

4.2.1. Definición de problema operativo de la cantera Ayacucho.

La cantera Ayacucho extrae roca caliza de su zona 1 y zona 2. Debido a la caída de la recuperación metalúrgica por una baja ley de %CaCO₃ de la roca caliza procedente de la zona 1 y zona 2, la rentabilidad operativa se ha visto afectada. Por ello, la empresa Cal y Cementos Sur ha decidido extraer roca caliza de la zona 3 de la cantera Ayacucho. La zona

1 tiene una ley promedio de %CaCO₃ igual a 49.52%; la zona 2, igual a 51.36%; y la zona, igual a 53.28%. Asimismo, pruebas en laboratorio químico han proyectado una recuperación metalúrgica de 71.50% para un procesamiento del 70% como mínimo de caliza kárstica, para una ley de cabeza mínima de %CaCO₃ igual 50.50%, y una máxima de 52.00% con un costo operativo de planta de 5.40 US\$/TM que procesa como máximo 60,450 TM/mes. Como cada zona de minado dentro de la cantera Ayacucho posee distintas extensiones y características topográficas, por lo que el costo de minado se ha definido por zona. Por último, el precio de venta de la cal sigue siendo 232 US\$/TM.

¿Cuál es el tonelaje y ley de roca caliza que debe extraerse por mes de cada zona de minado que maximice la rentabilidad operativa de la cal?

4.2.2. Construcción del modelo matemático para la cantera Ayacucho.

La construcción del modelo matemático para la cantera Ayacucho se basa mucho en el ejemplo práctico del Sindicato Minero Pacococha en Cuentas (2012), pero que se ajusta a la realidad operativa propia cantera Ayacucho. Este modelo se construye como se muestra a continuación:

PASO 1: Identificación de las variables de decisión.

Si bien en la cantera Ayacucho existen tres tipos de caliza que pueden ser minados, existen dos zonas como la Zona 1 y Zona 3 que tienen calizas definidas. La zona 1 tiene solo la caliza masiva negra, mientras que la zona 3, la caliza kárstica. La Zona 2 es la única zona que tiene programado extraer hasta los tres tipos de caliza. No obstante, así como se detalló en la tabla 3.1.: Reservas seleccionadas por zonas de la cantera Ayacucho; la roca caliza se tomará con un promedio por zona. Aclarado ello, las variables de este modelo son:

CZ1 = Número de toneladas de roca caliza a extraer de la zona 1 por mes.

CZ2 = Número de toneladas de roca caliza a extraer de la zona 2 por mes.

CZ3 = Número de toneladas de roca caliza a extraer de la zona 3 por mes.

PASO 2: Identificación de los datos del problema.

- a. El costo de minado por tonelada por cada zona:

Teniendo en cuenta el costo de cada operación unitaria dentro de la cantera Ayacucho que se detallaron en las tablas 3.2 hasta el 3.10, estos se resumieron en la siguiente tabla:

Tabla 4.2.: Parámetros de diseño de la cantera Ayacucho.

Costos por zonas de minado - Cal y Cementos Sur	Zona1 US\$/TM	Zona2 US\$/TM	Zona3 US\$/TM
Perforación	0.53	0.53	0.53
Voladura	0.45	0.45	0.45
Carguío	0.61	0.86	0.85
Transporte	1.38	1.60	1.71
Servicios auxiliares	0.07	0.12	0.15
Costo de minado	3.03	3.56	3.69

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

- b. El costo de procesamiento es de: 5.40 US\$/TM.
- c. El costo operativo de la zona 1 = costo de minado + costo de procesamiento, es decir; $3.03 + 5.40 = 8.43$ US\$/TM.
- d. El costo operativo de la zona 2 = costo de minado + costo de procesamiento, es decir; $3.56 + 5.40 = 8.96$ US\$/TM.
- e. El costo operativo de la zona 3 = costo de minado + costo de procesamiento, es decir; $3.69 + 5.40 = 9.09$ US\$/TM.
- f. La ley promedio de %CaCO₃ de la zona 1 es: 49.52%.
- g. La ley promedio de %CaCO₃ de la zona 2 es: 51.36%.
- h. La ley promedio de %CaCO₃ de la zona 3 es: 53.28%.

i. La recuperación metalúrgica proyectada procesando como mínimo 70% de caliza kárstica es de: 71.50%.

j. El precio de venta de la cal es de: 232 US\$/TM.

k. La ganancia por 1 tonelada de roca caliza de la zona 1 es:

$$\text{Ganancia zona 1} = LP\%CaCO_3 \times RM \times Cotz \times FC - COP$$

$$\text{Ganancia zona 1} = 49.52 \times 0.715 \times 232 \times 0.01 - 8.43 = 73.7138$$

$$\text{Ganancia zona 1} = 73.71 \text{ US\$/TM}$$

l. La ganancia por 1 tonelada de roca caliza de la zona 2 es:

$$\text{Ganancia zona 2} = LP\%CaCO_3 \times RM \times Cotz \times FC - COP$$

$$\text{Ganancia zona 2} = 51.36 \times 0.715 \times 232 \times 0.01 - 8.96 = 76.2359$$

$$\text{Ganancia zona 2} = 76.24 \text{ US\$/TM}$$

m. La ganancia por 1 tonelada de roca caliza de la zona 3 es:

$$\text{Ganancia zona 3} = LP\%CaCO_3 \times RM \times Cotz \times FC - COP$$

$$\text{Ganancia zona 3} = 53.28 \times 0.715 \times 232 \times 0.01 - 9.09 = 79.2908$$

$$\text{Ganancia zona 3} = 79.29 \text{ US\$/TM}$$

n. La capacidad máxima de procesamiento de la planta por mes es de: 60,450 TM/mes.

o. La ley de cabeza mínima de %CaCO₃ es: 50.50%.

p. La ley de cabeza máxima de %CaCO₃ es: 52.00%.

PASO 3: Identificación de la función objetivo.

FV: Maximizar la ganancia operativa por venta de cal.

D: Maximizar: ganancia por venta de cal de la zona 1 + ganancia por venta de cal de la zona 2 + ganancia por venta de cal de la zona 3.

FM: Maximizar:

$$73.71CZ1 + 76.24CZ2 + 79.29CZ3$$

PASO 4: Identificación de las restricciones.**A: Capacidad de procesamiento de la planta:**

FV: La capacidad máxima de procesamiento de la planta es de 60,450 TM por mes.

D: La roca caliza procesada de la zona 1 + la roca caliza procesada de la zona 2 + roca caliza procesada de la zona 3, debe ser como máximo 60,450 TM/mes.

FM:

$$CZ1 + CZ2 + CZ3 \leq 60,450$$

B: Ley de cabeza mínima de %CaCO₃:

FV: La ley de cabeza mínima es de 50.50% CaCO₃.

D: [(el contenido de %CaCO₃ de la zona 1 + el contenido de %CaCO₃ de la zona 2 + el contenido de %CaCO₃ de la zona 3) /el tonelaje de roca caliza de la zona 1 + zona 2 + zona 3)] debe ser mayor a 50.50%.

FM:

$$\left[\frac{49.52CZ1 + 51.36CZ2 + 53.28CZ3}{CZ1 + CZ2 + CZ3} \right] \geq 50.50$$

Entonces:

$$-0.98CZ1 + 0.86CZ2 + 2.78CZ3 \geq 0$$

C: Ley de cabeza máxima de %CaCO₃:

FV: La ley de cabeza máxima es de 52.00% CaCO₃.

D: [(el contenido de %CaCO₃ de la zona 1 + el contenido de %CaCO₃ de la zona 2 + el contenido de %CaCO₃ de la zona 3) / el tonelaje de roca caliza de la zona 1 + zona 2 + zona 3)] debe menor a 52.00%.

FM:

$$\left[\frac{49.52CZ1 + 51.36CZ2 + 53.28CZ3}{CZ1 + CZ2 + CZ3} \right] \leq 52.00$$

Entonces:

$$-2.48CZ1 - 0.64CZ2 + 1.28CZ3 \leq 0$$

D: Recuperación metalúrgica de la Cal:

FV: Para tener por lo menos 71.50% de recuperación metalúrgica de la cal, se debe procesar como mínimo 70% de caliza kárstica del total de producción por mes.

D: La roca caliza procesada de la zona 2 + roca caliza procesada de la zona 3, debe por lo menos 70% del total de (la roca caliza procesada de la zona 1 + la roca caliza procesada de la zona 2 + roca caliza procesada de la zona 3).

FM:

$$CZ2 + CZ3 \geq 0.70(CZ1 + CZ2 + CZ3)$$

Entonces:

$$-0.7CZ1 + 0.3CZ2 + 0.3CZ3 \geq 0$$

E: Restricciones lógicas:

$$CZ1, CZ2 \text{ y } CZ3 \geq 0$$

PASO 5: Formulación matemática del modelo.

Maximizar:

$$73.71CZ1 + 76.24CZ2 + 79.29CZ3$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
 CZ1 + CZ2 + CZ3 &\leq 60,450 \\
 -0.98CZ1 + 0.86CZ2 + 2.78CZ3 &\geq 0 \\
 -2.48CZ1 - 0.64CZ2 + 1.28CZ3 &\leq 0 \\
 -0.7CZ1 + 0.3CZ2 + 0.3CZ3 &\geq 0 \\
 CZ1, CZ2 \text{ y } CZ3 &\geq 0
 \end{aligned}$$

4.2.3. Resolución del modelo matemático de la cantera Ayacucho.

Para resolver el modelo matemático ya diseñado de la cantera Ayacucho, se ha utilizado el software Solver – Excel, teniéndose los resultados que se pueden ver en la imagen:

<u>Tonelaje y Ley de las 3 Zonas de Minado de la Cantera Ayacucho</u>						
Función Objetivo:	4,677,291.04					
	73.71	76.24	79.29			
	CZ1	CZ2	CZ3			
	18,135.00	4,785.63	37,529.38			
Restricciones:					RHS	Valor actual
Capacidad de planta	1	1	1	<=	60,450	60,450.00
Ley de cabeza min	-0.98	0.86	2.78	>=	0	90,675.00
Ley de cabeza max	-2.48	-0.64	1.28	<=	0	0.00
Recuperación de la Cal	-0.7	0.3	0.3	>=	0	0.00

Figura 4.1: Modelo matemático de la cantera Ayacucho resuelto por Solver.

Fuente: Tesista.

En la figura 4.1, se puede ver una solución óptima al modelo matemático planteado para la cantera Ayacucho, obteniéndose una rentabilidad operativa máxima total de US\$ 4'677,291.04, y la producción mensual en términos de objetivos operacionales, se resume en la siguiente tabla:

Tabla 4.3.: Objetivos operacionales para el plan de minado mensual.

Características Prod/mes	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Total/promedio
Roca caliza (TM/mes)	18,135.00	4,785.63	37,529.38	60,450.00
Ley de %CaCO ₃	49.52	51.36	53.28	52.00
Tipo de caliza	Masiva Negra	Kárstica	Kárstica	MN/K
% producción	30.00%	7.92%	62.08%	100.0%

Fuente: Tesista.

Según la figura 4.1 y tabla 4.3, la producción de la roca caliza de la zona 1 debe ser 18,135.00 TM/mes con una ley promedio de 49.5% CaCO₃ y el tipo de caliza a minar es la masiva negra. En tanto, la producción de la roca caliza de la zona 2 debe ser sólo 4,785.63 TM/mes con una ley promedio de 51.36% CaCO₃ y el tipo de caliza a minar es únicamente la kárstica (*1). Y finalmente, la producción de la roca caliza de la zona 3 debe ser 37,529.38 TM/mes con una ley promedio de 53.28% CaCO₃ y el tipo de caliza a minar es la kárstica.

Importante (*1):

Puede existir una controversia respecto a la zona 2 que tiene dos tipos de caliza, la kárstica y la masiva negra. La razón operativa para minar únicamente caliza kárstica de la zona 2, se debe principalmente a dos razones: 1. En el planteamiento del problema operativo, la baja de la recuperación metalúrgica se debe a una baja de la ley promedio de %CaCO₃, esto se ha debido principalmente a que la caliza kárstica de la zona 2, ha estado debajo de una expectativa geológica; por lo extraer caliza masiva negra por el momento no es una opción viable ya que posee aún menor ley de %CaCO₃ que la caliza kárstica. 2. Por lo general, en la cantera Ayacucho debe extraerse como mínimo 70% de caliza kárstica y esto es una restricción ordinaria para que la recuperación sea por lo menos 71.50%, que se relaciona con el punto 1, en el que necesariamente debe minarse caliza kárstica. Asimismo, en la hoja de respuestas de Solver, la restricción de la recuperación metalúrgica en la cal es calificada como “Vinculante” o en otras versiones

como “Obligatorio” – véase la figura 4.2; por ello, es importante tener en stock una caliza con una ley relativamente alta como la caliza kárstica para un eventual caso.

Celda objetivo (Máx)					
Celda	Nombre	Valor original	Valor final		
\$D\$4	Función Objetivo:	0.00	4,677,291.04		

Celdas de variables					
Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero	
\$D\$7	CZ1	0.00	18,135.00	Continuar	
\$E\$7	CZ2	0.00	4,785.63	Continuar	
\$F\$7	CZ3	0.00	37,529.38	Continuar	

Restricciones					
Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$I\$10	>= Valor actual	90,675.00	\$I\$10>=\$H\$10	No vinculante	90,675.00
\$I\$11	<= Valor actual	0.00	\$I\$11<=\$H\$11	Vinculante	0
\$I\$12	>= Valor actual	0.00	\$I\$12>=\$H\$12	Vinculante	0.00
\$I\$9	<= Valor actual	60,450.00	\$I\$9<=\$H\$9	Vinculante	0
\$D\$7	CZ1	18,135.00	\$D\$7>=0	No vinculante	18,135.00
\$E\$7	CZ2	4,785.63	\$E\$7>=0	No vinculante	4,785.63
\$F\$7	CZ3	37,529.38	\$F\$7>=0	No vinculante	37,529.38

Figura 4.2: Hoja de respuestas proporcionado por Solver.

Fuente: Tesista.

Solo para aclarar, en la figura 4.2, la celta \$I\$12 corresponde a la restricción de recuperación metalúrgica. Ello se puede apreciar a mayor detalle en el anexo N° 02.

4.3. Verificando la recuperación metalúrgica de la cal y los costos de minado obtenidos al extraer roca caliza de la zona 1, 2 y 3:

En este punto ha de medirse el impacto operativo que puede generar la solución del modelo matemático sobre los costos de minado, recuperación metalúrgica y ley promedio de %CaCO3 cantera Ayacucho. Para ello, primero debe realizarse planes de minado

mensual que expresen la solución determinística en un plan de trabajo para que en segunda instancia, el área de operaciones de la cantera Ayacucho pueda extraer el tonelaje y ley de caliza de cada zona de minado. Véase a continuación el proceso de desarrollo de este objetivo 2:

4.3.1. Diseño del plan de minado mensual.

El plan de minado mensual ha de fijar lineamientos y estrategias para el área de operaciones mina de la cantera Ayacucho, ya que sólo con la solución del modelo matemático, no se puede tener el éxito deseado. Sino que es necesario saber el cómo extraer la roca caliza de cada zona, de que frentes de minado, en que tiempo y otros. Si bien en un plan de minado mensual siempre van a existir condiciones cambiantes o variables, fue importante saber que cada plan de minado mensual ha sido diseñado teniendo como premisa la solución del modelo matemático que para el plan de minado mensual llega a ser: “los objetivos operacionales”.

Para cada mes se ha diseñado un plan de minado distinto, pero con los mismos objetivos operacionales. Véase a continuación un resumen del plan de minado mensual que se elaboró para octubre del 2018:

4.3.1.1. Plan de minado mensual de octubre 2018.

A: Objetivos operacionales:

Los objetivos operacionales para el plan de minado mensual de octubre se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.4.: Objetivos operacionales para el mes de octubre 2018.

Características Prod/mes	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Total/promedio
Roca caliza (TM/mes)	18,135.00	4,785.63	37,529.38	60,450.00
Ley de %CaCO ₃	49.52	51.36	53.28	52.00
Tipo de caliza	Masiva Negra	Kárstica	Kárstica	MN/K
% producción	30.00%	7.92%	62.08%	100.0%

Fuente: Tesista.

B: Calendario de producción:

En el mes de octubre del 2018, de los 31 días calendario se debía trabajar 26 días agrupados en 5 semanas laborables. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.5.: Calendario de producción de octubre 2018.

Periodo	Periodo de trabajo		N° días	Producción TM por día	
	Inicio	Final		Mineral	Desmante
Semana 01	01-oct-2018	07-oct-2018	6	1,950	293
Semana 02	07-oct-2018	12-oct-2018	5	1,950	293
Semana 03	12-oct-2018	18-oct-2018	6	1,950	293
Semana 04	18-oct-2018	24-oct-2018	6	1,950	293
Semana 05	24-oct-2018	27-oct-2018	3	1,950	293
Total de días laborales			26		

Fuente: Cal y Cementos Sur.

C: Budget de producción:

Para el mes de octubre del 2018, el área de planeamiento ha dispuesto tres destinos: a) El “Ore Pile – MG”, que posee dos pilas, en el que se debe depositar caliza masiva negra de la zona 1 y caliza kárstica de la zona 2; b) El “Ore Pile – HG”, que posee hasta 4 pilas, en que únicamente se debe depositar caliza kárstica distribuidos por cada Pit para un mejor control; y c) El botadero “WG-01” en el que se debe depositar desmante.

1) Producción por semanas:

Dentro de un plan de minado, es vital incluir el calendario de producción dentro de la proyección de la producción. Véase el resumen de producción por semana en la siguiente tabla:

Tabla 4.6.: Producción de octubre 2018 por semanas.

Periodo	Ore Pile - MG		Ore Pile - HG		Dump WG - 01 Toneladas	Resumen del total	
	Toneladas	CaCO3%	Toneladas	CaCO3%		Toneladas Material	S.R.
Semana 01	3,727.35	49.50	7,974.51	53.48	2,637.34	14,339.20	0.23

Semana 02	3,886.82	49.50	8,386.28	53.29	2,118.57	14,391.67	0.17
Semana 03	3,682.99	49.50	10,129.26	53.50	2,589.71	16,401.97	0.19
Semana 04	8,236.63	50.24	5,446.47	53.50	0.00	13,683.10	0.00
Semana 05	7,469.78	51.42	8,388.45	53.28	3,050.78	18,909.01	0.19
Grand Total	27,003.57	50.29	40,324.97	53.40	10,396.41	77,724.94	0.15

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Como se aprecia en la tabla 4.x, para cada semana se ha programado diferente cantidad de tonelaje y ley, así como desmante que se debe minar; moviéndose por semana un promedio de 15,000 TM de material. Véase la siguiente figura:



Figura 4.3: Vista grafica de la producción por semanas del mes de octubre.

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Si bien en la figura 4.3, se puede ver bastante variabilidad en la producción, esto se debe a la producción de las tres flotas y a su disponibilidad mecánica que varía semana en semana.

2) *Producción por zonas de minado:*

Si hay un aspecto muy importante por saber dentro del plan de minado mensual de octubre 2018, es la producción por zonas de la cantera Ayacucho. Esta producción por zonas se traza desde los objetivos operacionales. Véase el resumen de la producción por zonas en la siguiente tabla:

Tabla 4.7.: Producción de octubre 2018 por zonas de minado.

Zona de Minado	Ore Pile - MG		Ore Pile - HG		Dump WG - 01	Grand Total	Distribución	
	Toneladas	CaCO3%	Toneladas	CaCO3%	Toneladas	Toneladas Mineral	S.R.	%
Zona 1	18,919.86	49.50	0.00	0.00	4,719.41	18,919.86	0.25	28%
Zona 2	8,083.71	52.14	0.00	0.00	1,780.82	8,083.71	0.22	12%
Zona 3	0.00	0.00	40,324.97	53.40	3,896.18	40,324.97	0.10	60%
Total:	67,328.54		52.16		10,396.41	67,328.54	0.15	100%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.7, en el mes de octubre; de la zona 1 ha de minarse 18,919.86 TM de caliza masiva negra con una ley promedio de 49.50 %CaCO₃, de la zona 2 ha de minarse 8,083.71 TM de caliza kárstica con una ley promedio de 52.14 %CaCO₃, y de la zona 3 ha de minarse 40,324.97 TM de caliza kárstica con una ley promedio de 53.40 %CaCO₃; todo ello da un total de 67,328.54 TM de roca caliza con una ley promedio de 52.16 %CaCO₃. Véase las siguientes figuras:



Figura 4.4: Vista grafica de la producción por zonas del mes de octubre.

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Conforme a la figura 4.4, el plan de minado del mes de octubre se ciñe mucho a los objetivos operacionales, pero la zona 2, es en el que más cambios tiene, teniendo 8,083.71 TM de caliza kárstica frente a los 4,785.63 TM/mes del objetivo operacional; ello se debe principalmente para concentrar la operatividad de la flota de carguío y transporte, puesto que los proyectos de la zona 2, ubicados en el PIT_J, se programaron en las ultimas de semanas tal que se pueda extraer de esta zona tanto para octubre como para noviembre.



Figura 4.5: Vista distribución porcentual de la producción por zonas del mes de octubre.

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Sin bien en los objetivos operacionales del mes de octubre, los porcentajes de producción por zona de roca caliza eran: Zona 1 = 30%, Zona 2 = 8% y Zona 3 = 62%, de acuerdo al plan de minado de octubre, estos porcentajes son: Zona 1 = 28%, Zona 2 = 4% y Zona 3 = 60% como se aprecia en la figura 4.5. Existe relativa diferencia con respecto a la Zona 2, pero comprendiendo este desfase, el plan de minado de octubre se ajusta mucho a los objetivos operacionales.

D: Programa de producción detallado:

El programa de producción detallado, a grandes rasgos, para el mes de octubre se desarrolla teniendo como base la separación por zonas y ordenamiento por semanas calendario. Véase este programa a continuación:

Para zona 1:

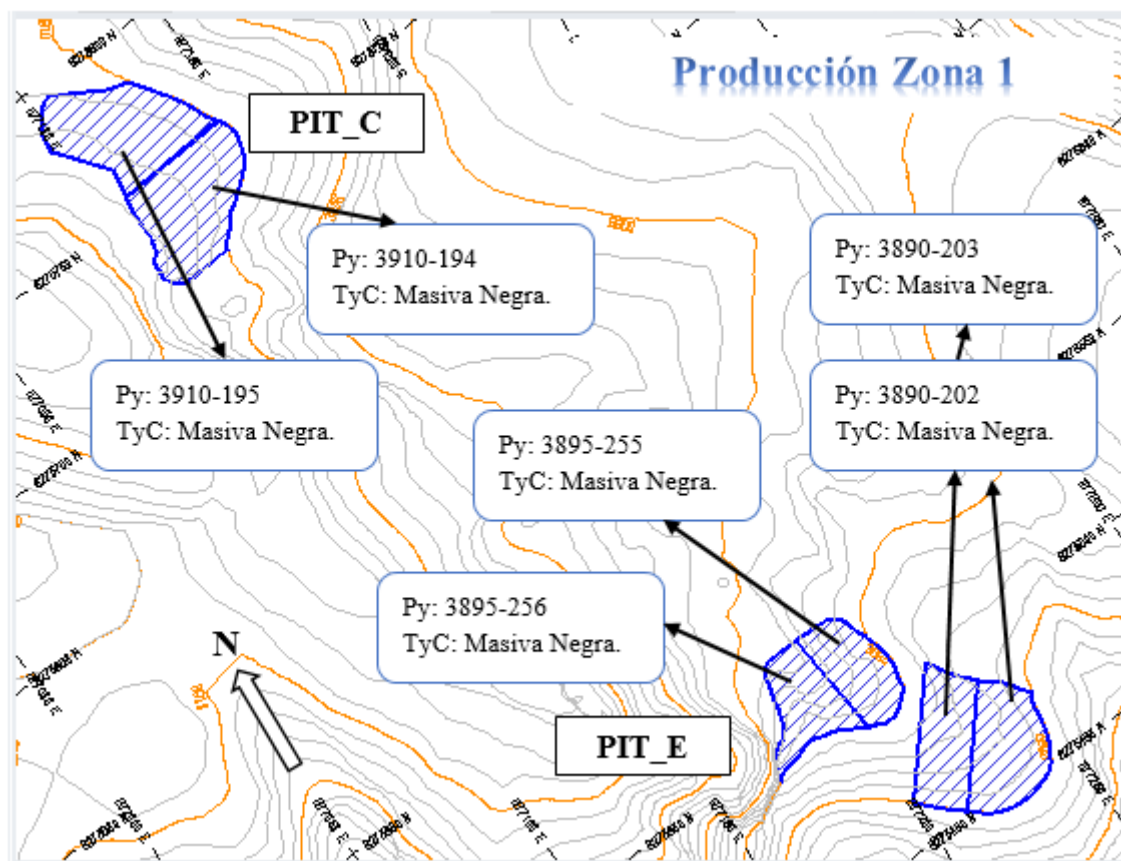


Figura 4.6: Diseño de la producción de la zona 1 para el mes de octubre.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

- i. Semana 1: Debía minarse los proyectos 3895-255 y 3895-256, ubicados en el PIT_E.
- ii. Semana 2: Debía minarse el proyecto 3910-194, ubicado en el PIT_C.
- iii. Semana 3: Debía minarse el proyecto 3910-195, ubicado también en el PIT_C.
- iv. Semana 4: Debía minarse el proyecto 3890-202, ubicado en el PIT_E.
- v. Semana 5: Debía minarse el proyecto 3890-203, ubicado también en el PIT_E.

Con ello se culmina la producción de la zona 1, minándose un total de 18,919.86 TM de caliza masiva negra con una ley promedio de 49.50 %CaCO₃ y removiendo 4,719.41 TM de desmonte al botadero WG-01.

Para zona 2:

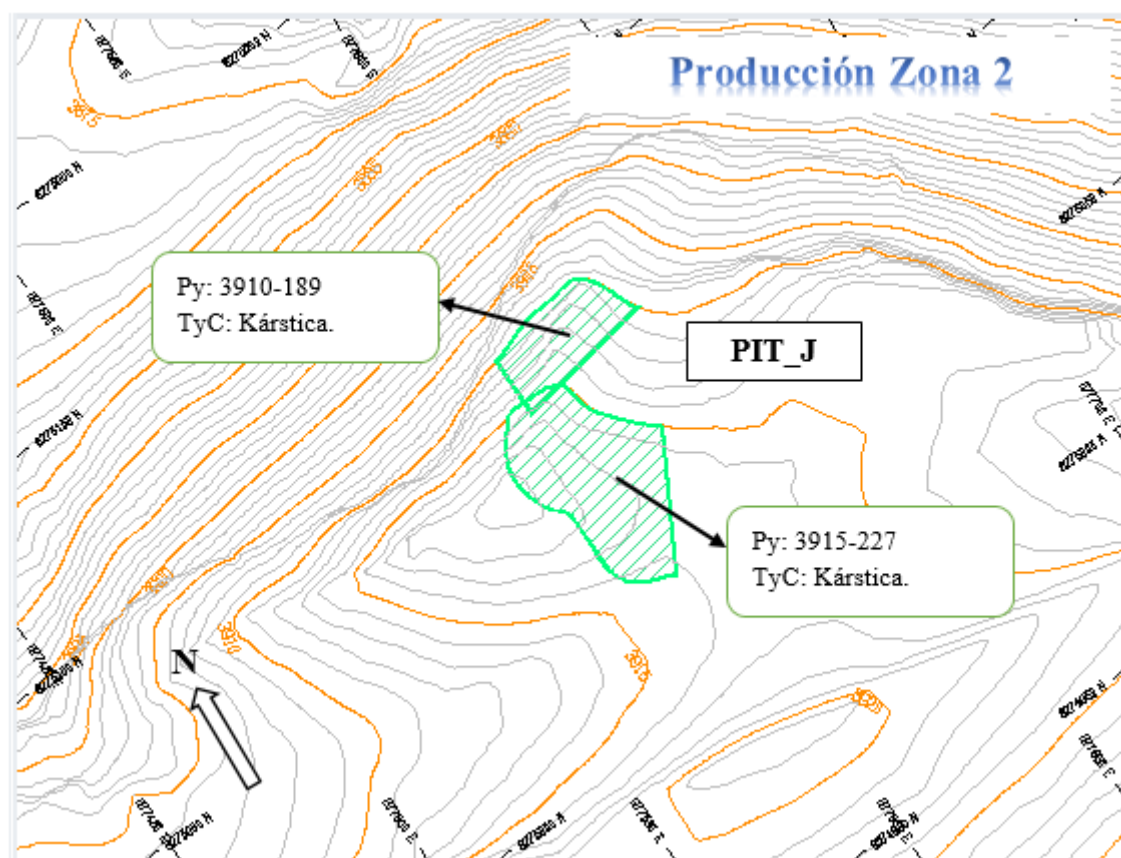


Figura 4.7: Diseño de la producción de la zona 2 para el mes de octubre.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

- i. Semana 4: Debía minarse el proyecto 3915-227, ubicado en el PIT_J.
- ii. Semana 5 y semana 1 de noviembre: Debía minarse el proyecto 3910-189, ubicado también en el PIT_J.

Con ello se culmina la producción de la zona 2, minándose un total de 8,083.71 TM de caliza kárstica con una ley promedio de 52.14 %CaCO₃ y removiendo 1,780.82 TM de desmonte al botadero WG-01.

Para zona 3:

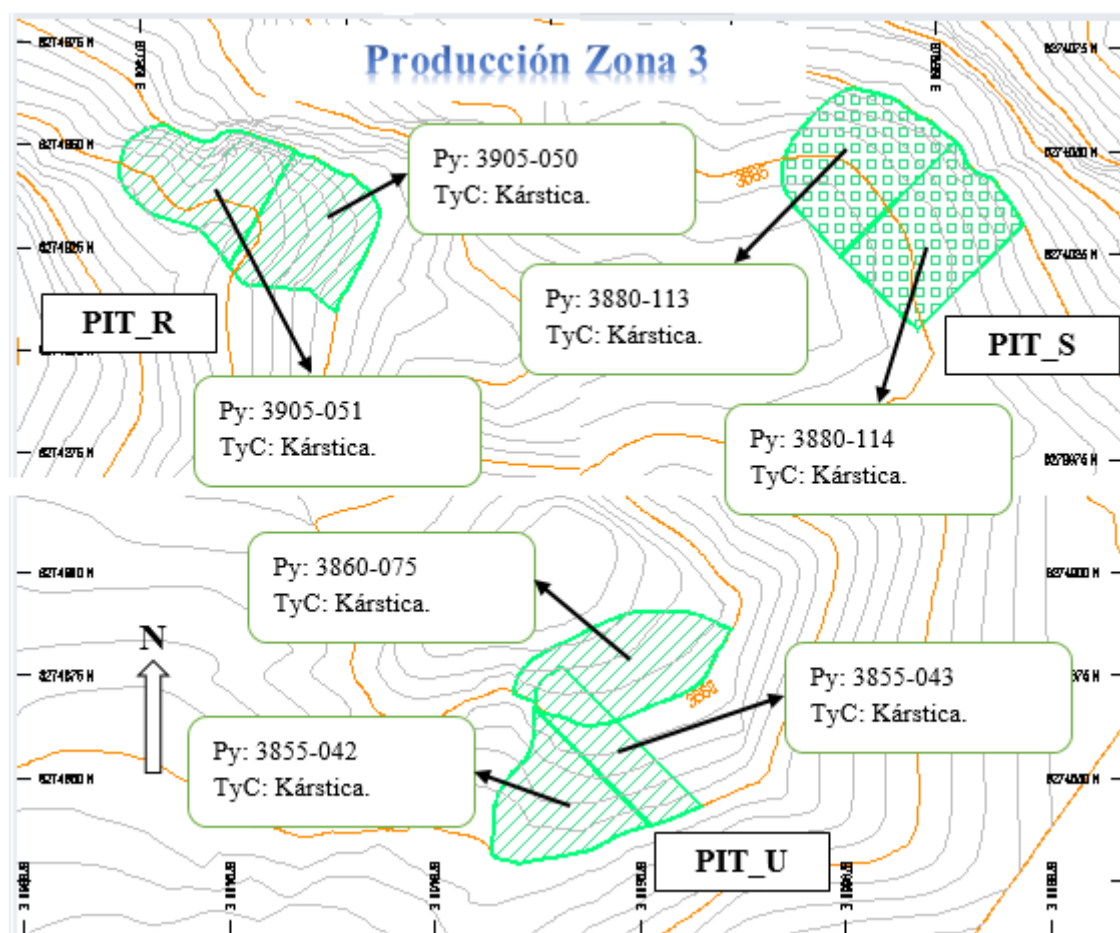


Figura 4.8: Diseño de la producción de la zona 3 para el mes de octubre.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

- i. Semana 1: Debía minarse los proyectos 3905-050 y 3860-075, ubicados en el PIT_R y PIT_U respectivamente.
- ii. Semana 2: Debía minarse el proyecto 3880-113, ubicado en el PIT_S.
- iii. Semana 3: Debía minarse los proyectos 3905-051 y 3855-042, ubicados en el PIT_R y PIT_U respectivamente.
- iv. Semana 4: Debía minarse el proyecto 3855-043, ubicado en el PIT_U.
- v. Semana 5: Debía minarse el proyecto 3880-113, ubicado en el PIT_S.

Con ello se culmina la producción de la zona ., minándose un total de 40,324.97 TM de caliza kárstica con una ley promedio de 53.40 %CaCO₃ y removiendo 3,896.18 TM de desmonte al botadero WG-01.

En resumen, el programa de producción detallado para el mes de octubre tiene el siguiente lienzo del proceso (proces of canvas):

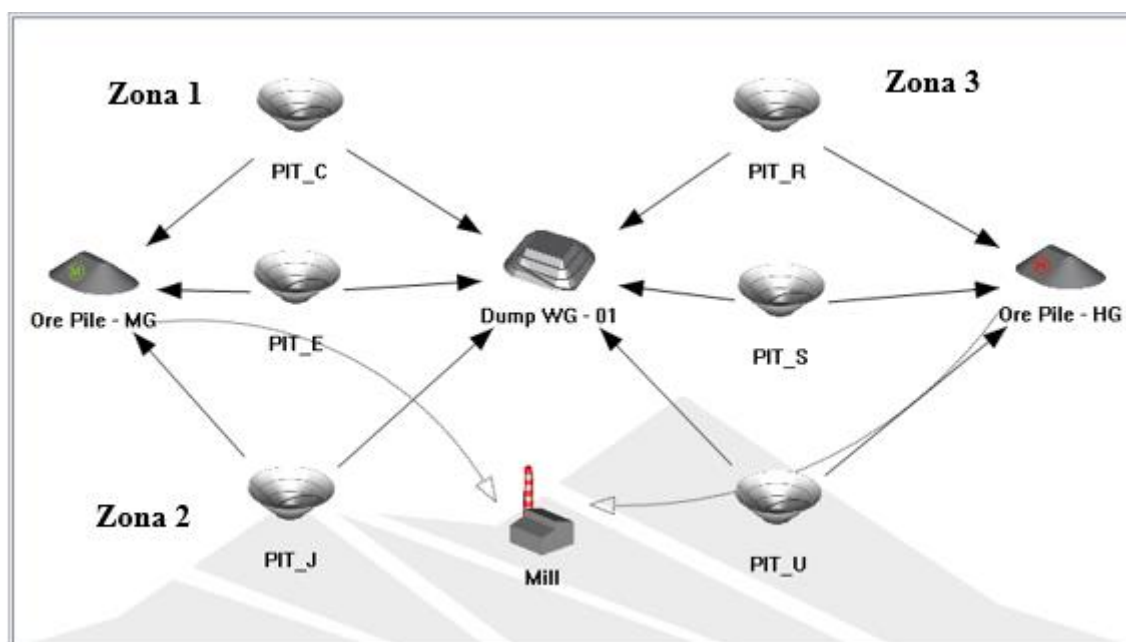


Figura 4.9: Lienzo del proceso de producción para el mes de octubre – MM.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

Asimismo, la tabla del programa detallado para el mes de octubre se puede apreciar en el anexo N° 03.

E: Proyección de la cal recuperada y los costos de minado:

La proyección de la cal que se ha de recuperar para el mes de octubre, se hizo teniendo en cuenta una recuperación metalúrgica de 71.50% y el tonelaje total a minar por semana. Véase esta proyección en la siguiente tabla y figura:

Tabla 4.8.: Cal recuperado por semana para una RM igual a 71.50%.

Periodo	Mineral TM	Ley	Cal Recuperado
	TM	CaCO3%	TM
Semana 01	11,701.86	52.21	4,368.28
Semana 02	12,273.10	52.09	4,570.76
Semana 03	13,812.26	52.43	5,178.20
Semana 04	13,683.10	51.54	5,042.20
Semana 05	15,858.23	52.40	5,941.85
Grand Total	67,328.54	52.14	25,101.29

Fuente: Cal y Cementos Sur.



Figura 4.10: Vista gráfica de la cal recuperada vs las toneladas de mineral extraído.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.8 y figura 4.10, para una recuperación metalúrgica proyectada de 71.50% se provee recuperar 25,101.29 TM de Cal, esto de acuerdo a las toneladas minadas desde las 3 zonas de minado de la cantera Ayacucho.

Del mismo modo, teniendo los porcentajes de producción de las 3 zonas de minado de la cantera Ayacucho, los costos proyectados para el mes de octubre se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4.9.: Costos de minado proyectado para el mes de octubre.

Composición de los costos de minado:	Zona1 US\$/TM	Zona2 US\$/TM	Zona3 US\$/TM	Costo proyectado US\$/TM
<i>% Producción</i>	28.10%	12.01%	59.89%	<i>100.00%</i>
Perforación	0.53	0.53	0.53	0.53
Voladura	0.45	0.45	0.45	0.45
Carguío	0.61	0.86	0.85	0.78
Transporte	1.38	1.60	1.71	1.60
Servicios auxiliares	0.07	0.12	0.15	0.12
Total del costo de minado:	3.03	3.56	3.69	3.49

Fuente: Cal y Cementos Sur.

POR LO TANTO:

Se ha visto a grandes rasgos un plan de minado mensual, específicamente de octubre 2018 que tiene como base los objetivos operacionales derivados de la solución del modelo matemático. Entonces, los planes de minado siguientes como de: noviembre, diciembre del 2018 y enero del 2019; siguen el mismo procedimiento, teniendo siempre alguna variabilidad.

4.3.2. Impactos y repercusiones operacionales.

El área de operaciones mina de la cantera Ayacucho, es el encargado de ejecutar y materializar el plan de minado mensual con la finalidad de extraer roca caliza que posteriormente tiene que ser procesado por la planta de concentración. Ya desde ese contexto se tendrá el tonelaje cumplido por mina y el tonelaje procesado por planta, así como otros impactos y repercusiones operacionales. Estos impactos se organizaron de acuerdo a las dimensiones de la variable independiente, véase a continuación:

4.3.2.1. Costos de minado en la cantera Ayacucho.

Si bien los costos de minado han sido proyectados con estimaciones para construir el modelo matemático, los costos de minado reales o efectivos han sido distintos, véase a continuación cuales fueron los costos reales por cada operación unitaria además de su variabilidad:

A. Los costos en perforación.

Para perforación se utilizaron dos perforadoras, la P-01, se ubicó como siempre, en la zona 1 y 2 de la cantera; mientras que la P-02, se ubicó en la zona 3. Contrariamente de lo que se pudo estimar al principio, los costos de perforación no se incrementaron al incluir la zona 3, ya que los metros perforados por mes no sufrieron cambios impactantes. Los costos de perforación después de incluir la zona 3 se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.10.: Costos de perforación después de incluir la zona 3.

Costos operativos de perforación:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Metros perforados (m/mes)	8,234.50	8,194.77	8,365.93	7,985.62	8,195.21
Costo total de perforación (US\$/mes)	34,418.46	33,975.53	34,954.12	33,741.31	34,272.35
Tonelaje cumplido - minado	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
Costo por tonelada real (US\$/TM)	0.532	0.530	0.524	0.528	0.528
<i>Costo por tonelada proyec. (US\$/TM)</i>	<i>0.526</i>	<i>0.526</i>	<i>0.526</i>	<i>0.526</i>	<i>0.526</i>
% de Variación proyec/real	1.05%	0.68%	-0.47%	0.41%	0.41%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Conforme a la tabla 4.10, los costos de perforación reales en los meses de octubre hasta enero del 2019 han sido sólo 0.41% en promedio más que los costos perforación proyectados. Esto nos indica que, no habido cambios relevantes en los costos de perforación al incluir la zona 3.

B. Los costos en voladura.

Para voladura no hubo cambios, ya que el tonelaje mensual ha sido el que por lo general se proyecta, aun cuando se incluyó la zona 3. Asimismo, las rocas dominantes de

la zona 3, no difieren mucho a los de la zona 1 y 2. Los costos de voladura después de incluir la zona 3 se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.11.: Costos de voladura después de incluir la zona 3.

Costos operativos de voladura:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Costo total de voladura (US\$/mes)	28,634.88	27,347.95	31,623.76	28,463.84	29,017.61
Tonelaje cumplido - minado	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
Costo por tonelada real (US\$/TM)	0.442	0.426	0.474	0.446	0.447
<i>Costo por tonelada proyec. (US\$/TM)</i>	<i>0.452</i>	<i>0.452</i>	<i>0.452</i>	<i>0.452</i>	<i>0.452</i>
% de Variación proyec/real	-2.03%	-5.56%	4.94%	-1.29%	-0.98%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.11, los costos de voladura reales en los meses de octubre hasta enero del 2019 han sido 0.98% en promedio menos que los costos voladura proyectados. Esto nos indica que, tampoco habido cambios relevantes en los costos de voladura al incluir la zona 3.

C. Los costos en carguío y transporte.

El carguío y transporte es una de las operaciones unitarias con mayor impacto después de servicios auxiliares; al incluir en el minado de la cantera a la zona 3. Esto se debe a que la zona 3 es una zona más dispersa que la zona 1 y 2, y tiene mayor distancia de acarreo.

Si bien para construir el modelo matemático se utilizó un costo de carguío y transporte proyectado de 2.39 US\$/TM. Este costo es un tanto somero ya que fue estimado en base a ASARCO sin la intervención del software Haulage. No obstante, después de tener el plan de minado, se utilizó el software Haulage para simular el carguío y transporte, y mejorar el costo proyectado de transporte, el cual fue 2.457 US\$/TM. Asimismo, el hecho de que la producción de la zona 2 se permutara casi en su totalidad con la zona 3, permitió que el análisis por Haulage sea mejor, teniéndose la siguiente designación de equipos por cada zona de acuerdo a Haulage:

A. En la zona 1: Se asignó a la Flota 03 para los tajos: PIT_C, PIT_E y PIT_D.

B. En la zona 2: Se asignó a la Flota 01 para el tajo: PIT_J.

C. En la zona 3: Se asignó a la Flota 01 para el tajo: PIT_R; mientras que la Flota 02 para los tajos: PIT_S, PIT_U y PIT_T.

Esto para una composición de Flotas de la siguiente manera:

Flota 01: Car – 1 y Camión volvo FM 440.

Flota 02: Car – 2 y Camión MB Actros.

Flota 03: Pala 1 – Camión volvo FM 440.

Por último, los costos de carguío y transporte después de incluir la zona 3 se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.12.: Costos de carguío y transporte después de incluir la zona 3.

Costos operativos de carguío y transporte:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Costo total de carguío + transporte (US\$/mes)	168,456.73	165,823.84	173,215.99	166,121.99	168,404.64
Tonelaje cumplido - minado	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
Costo por tonelada real (US\$/TM)	2.603	2.586	2.596	2.602	2.596
<i>Costo por tonelada proyec. (US\$/TM)</i>	2.386	2.386	2.386	2.386	2.386
% de Variación proyec/real	9.09%	8.38%	8.79%	9.04%	8.82%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Según la tabla 4.12, los costos de carguío y transporte reales en los meses de octubre hasta enero del 2019 han sido 8.82% en promedio más que los costos carguío y transporte proyectados. Este incremento ha sido relativamente alto; lo cual nos indica que, si hubo cambios relevantes en los costos de carguío y transporte al incluir la zona 3.

D. Los costos en servicios auxiliares.

Los servicios auxiliares mina ha sido otra operación unitaria que tuvo gran impacto al incluir el minado la zona 3. Este impacto principalmente se dio en los dos primeros meses, ya que minar la zona implicó habilitar varias vías de acceso nuevas y esto no se tomó en cuenta para los costos estimados e incluidos en el modelo matemático. Los costos de servicios auxiliares mina después de incluir la zona 3 se pueden ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.13.: Costos de servicios auxiliares mina después de incluir la zona 3.

Costos operativos de servicios auxiliares:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Habilitación de vías de acceso	2,525.83	1,634.54	923.85	463.74	1,386.99
Mantenimiento de vías y botaderos	1,182.76	1,056.95	1,012.87	1,109.47	1,090.51
Perforación y voladura - asistencia	4,863.75	4,623.59	5,044.71	4,789.89	4,830.49
Carguío y transporte - asistencia	1,857.92	1,746.94	2,007.65	1,803.73	1,854.06
Costo total de SA (US\$/mes)	10,430.27	9,062.02	8,989.09	8,166.83	9,162.05
Tonelaje cumplido - minado	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
Costo por tonelada real (US\$/TM)	0.161	0.141	0.135	0.128	0.141
<i>Costo por tonelada proyec. (US\$/TM)</i>	<i>0.124</i>	<i>0.124</i>	<i>0.124</i>	<i>0.124</i>	<i>0.124</i>
% de Variación proyec/real	30.43%	14.38%	9.02%	3.51%	14.34%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Conforme a la tabla 4.13, los costos de servicios auxiliares mina real en los meses de octubre hasta enero del 2019 han sido 14.34% en promedio más que los costos servicios auxiliares mina proyectados. Esto se debió principalmente a la habilitación de nuevas vías de acceso al principio del minado de la zona 3.

En resumen, ha habido diferencia entre los costos de minado proyectados e incluidos en la construcción del modelo matemático, y los costos de minado reales dentro de la cantera Ayacucho. Véase las siguientes tablas:

Tabla 4.14.: Resumen de los costos de minado reales al incluir la zona 3.

Costos de minado operativo:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Costo total de perforación (US\$/mes)	34,418.46	33,975.53	34,954.12	33,741.31	34,272.35
Costo total de voladura (US\$/mes)	28,634.88	27,347.95	31,623.76	28,463.84	29,017.61
Costo total de car + trans (US\$/mes)	168,456.73	165,823.84	173,215.99	166,121.99	168,404.64
Costo total de SA (US\$/mes)	10,430.27	9,062.02	8,989.09	8,166.83	9,162.05
Costo total de minado (US\$/mes)	241,940.34	236,209.34	248,782.96	236,493.96	240,856.65

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Según la tabla 4.14, el costo de minado total después de incluir la zona ascendió hasta los US\$ 240,856 en promedio por mes.

Tabla 4.15.: Análisis de variación entre los costos de minado proyectado y reales.

Análisis de variación:	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Costo total de minado (US\$/mes)	241,940.34	236,209.34	248,782.96	236,493.96	240,856.65
Tonelaje cumplido - minado	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
Costo por tonelada real (US\$/TM)	3.738	3.684	3.728	3.704	3.713
Costo por tonelada proyec. (US\$/TM)	3.487	3.487	3.487	3.487	3.487
% de Variación proyec/real	7.19%	5.63%	6.90%	6.20%	6.48%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.15, los costos de minado reales han sido 6.48% en promedio más que los costos de minado proyectados, presentado así una cierta variación principalmente por carguío y transporte, así como por servicios auxiliares.

Ahora, si comparamos los costos de minado reales antes y después de incluir la zona 3, la variación es mucho más, ello se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 4.16.: Variación en costos de minado reales antes y después de la zona 3.

Meses operativos en Antes:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Meses operativos en Después:	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
A: CM - Zona 1 y 2	3.297	3.330	3.322	3.320	3.317
D: CM - Zona 1, 2 y 3	3.738	3.684	3.728	3.704	3.713
Diferencia entre A y B	0.44	0.35	0.41	0.38	0.40
% de Variación	13.39%	10.62%	12.23%	11.56%	11.95%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Conforme a la tabla 4.16, los costos de minado reales después de incluir la zona 3 en minado de la cantera, ha sido 11.95% en promedio más que los costos de minado reales que cuando solo se minada las zonas 1 y 2. Esta variación se puede apreciar también en la siguiente imagen:

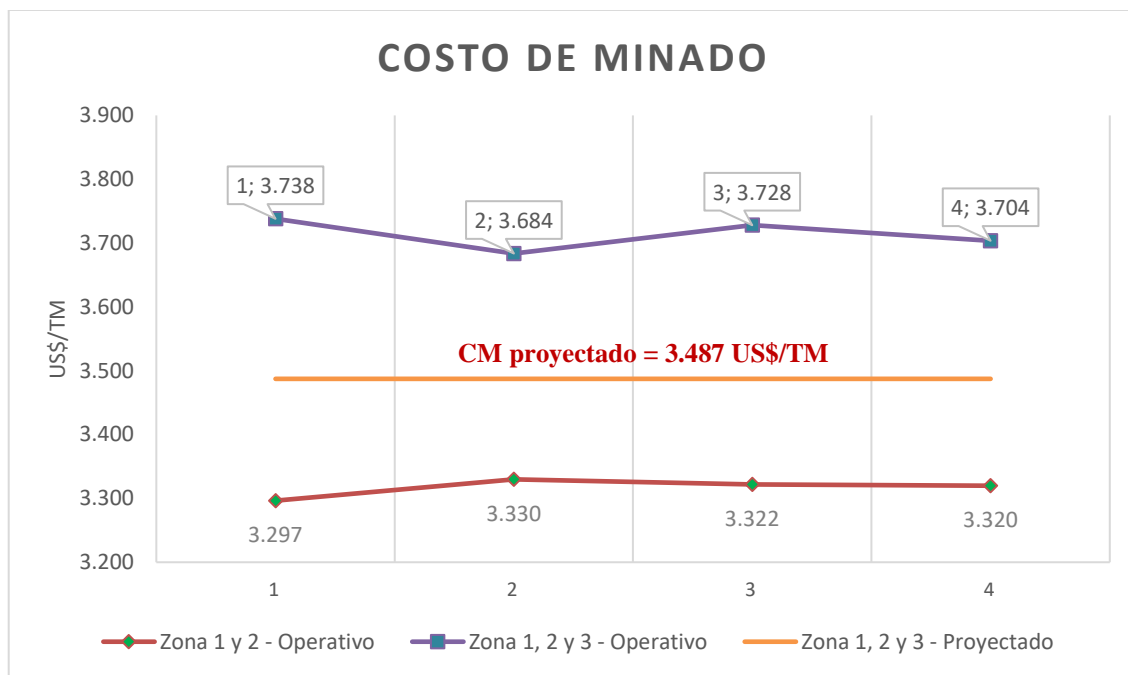


Figura 4.11: Variación de los costos de minado antes y después de la zona 3.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

Según la figura 4.11, existe una variancia notable entre los costos de minado operativos después de incluir a la zona 3, siendo los más altos, incluso que los costos proyectados. En tanto los costos de minado operativos de la zona 1 y 2, son los que menor costo de minado presentan.

4.3.2.2. Roca caliza minada y procesada en la cantera Ayacucho.

A: Roca caliza minada:

Al incluir la zona 3 en el minado con la zona 1 y 3, se creía en un principio que afectaría las toneladas minadas en cada, empero, esto no ha sido así, ya que la solución del modelo matemático asignó un 60% de la producción a la zona 3, concentrando mejor la operación de minado. Ello permitió que las toneladas cumplidas estén a la par de las programadas. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.17.: Variación entre el tonelaje y ley cumplido vs el programado en minado.

Producción de roca caliza:		Año 2018			2019	Promedio
		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Proyectado - plan	(TM/mes)	67,328.54	63,876.85	65,472.93	65,856.48	65,633.70
de minado	Ley % CaCO ₃	52.16	52.31	52.22	52.19	52.220
Cumplido -	(TM/mes)	64,723.84	64,124.39	66,734.74	63,854.94	64,859.48
operación mina	Ley % CaCO ₃	52.054	52.139	52.176	52.115	52.122
% Variación	(TM/mes)	-3.87%	0.39%	1.93%	-3.04%	-1.18%
	Ley % CaCO ₃	-0.19%	-0.34%	-0.08%	-0.15%	-0.19%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Según la tabla 4.17, la variación del tonelaje de roca caliza cumplido por minado vs el programado por el plan de minado ha sido sólo 1.18% menos en promedio. En caso de la ley de CaCO₃, la variación ha sido 0.19% menos en promedio. En ambos casos, el minado ha cumplido con lo programado.

B: Roca caliza procesada:

El tonelaje procesado en planta es una consecuencia del tonelaje minado por la cantera Ayacucho; si bien no existe una interdependencia ya que el proceso en planta es un área diferente al de minado, se puede afirmar que planta operó sin mayor contratiempo. Ello permitió que las toneladas procesadas por mes estén a la par del target de producción mensual. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.18.: Variación entre el tonelaje y ley procesado vs el target en planta.

Producción de roca caliza:		Año 2018			2019	Promedio
		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Procesado - en	(TM/mes)	61,004.56	59,756.45	61,076.74	61,038.91	60,719.17
planta	Ley % CaCO ₃	52.038	52.077	52.107	52.084	52.077
Target - en planta	(TM/mes)	60,459.00	58,500.00	60,459.00	60,459.00	59,969.25
	Ley % CaCO ₃	52.000	52.000	52.000	52.000	52.000
% Variación	(TM/mes)	0.90%	2.15%	1.02%	0.96%	1.25%
	Ley % CaCO ₃	0.07%	0.15%	0.21%	0.16%	0.15%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

En la tabla 4.18, se aprecia que el tonelaje procesado está a la par del target operacional de planta, presentando una variación promedio de 1.25%.

4.3.2.3. *Recuperación metalúrgica de la cal.*

En la prueba de recuperación metalúrgica se estimó un recuperación promedio de 71.50%, esto teniendo en cuenta un producción de caliza kárstica de 30% para la zona 2 y 40% de caliza kárstica para la zona 3, el resto era caliza masiva negra de la zona 1.

De acuerdo a la solución del modelo matemático, la zona 2 debía producir solo 8% de caliza kárstica, mientras que el 62% de caliza kárstica de la zona 3. Esto trajo mejoras inesperadas en la recuperación metalúrgica tras incluir 60% de caliza kárstica de la zona 3. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.19.: Variación de la recuperación metalúrgica de la cal proyectada/operativa.

Datos operativos de planta:		Año 2018			2019	Promedio
		Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Roca caliza	(TM/mes)	61,004.56	59,756.45	61,076.74	61,038.91	60,719.17
Procesado	Ley %CaCO ₃	52.038	52.077	52.107	52.084	52.077
Recuperación	Operativo	74.11%	73.85%	74.04%	73.78%	73.95%
metalúrgica (%)	Target	71.50%	71.50%	71.50%	71.50%	71.50%
% Diferencia Target/Operativo		2.6%	2.4%	2.5%	2.3%	2.4%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.19, puede ver que la recuperación metalúrgica operativa de la cal ha sido 2.4% en promedio más que el target u objetivo planteado en el modelo matemático. Esto ha beneficiado mucho a la operatividad de la planta, generando un incremento sustancial entre la recuperación metalúrgica antes de incluir caliza kárstica de la zona 3 y después de incluir caliza kárstica de la zona 3. Véase también la siguiente tabla:

Tabla 4.20.: Variación del RM (%) de la cal antes y después de incluir la zona 3.

Meses operativos en Antes:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Meses operativos en Después:	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
A: RM% de Cal - Zona 1 y 2	63.36%	62.73%	64.02%	63.55%	63.42%
D: RM% de Cal - Zona 1, 2 y 3	74.11%	73.85%	74.04%	73.78%	73.95%
Diferencia entre A y B	10.75%	11.12%	10.02%	10.23%	10.53%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Según la tabla 4.20, en un contraste antes y después de incluir a la zona 3, la recuperación metalúrgica operativa de la cal presento un incremento promedio de 10.53%. Véase también la varianza de la recuperación metalúrgica en la siguiente imagen:

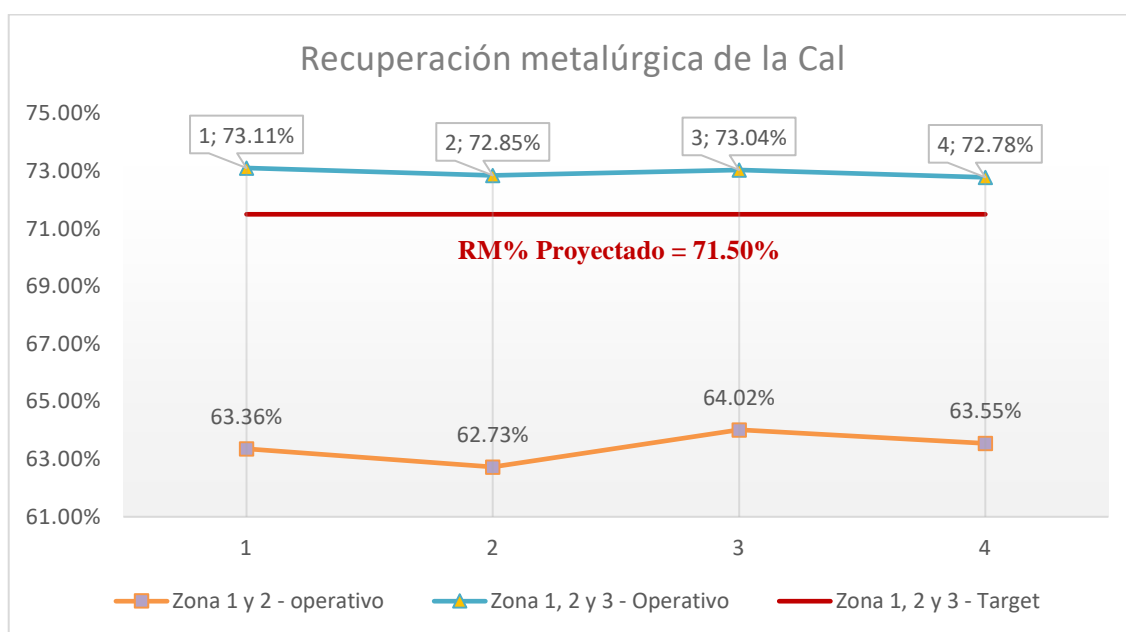


Figura 4.12: Variación de la recuperación metalúrgica antes y después de la zona 3.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

Por lo tanto: El incluir la zona 3 en la producción de roca caliza en la cantera Ayacucho, ha sido una decisión acertada desde el punto de vista de la recuperación metalúrgica, pues este se ha incrementado en 10.53% en promedio. No obstante, el costo de minado también se ha aumentado en 11.95% en promedio, contraponiéndose a la mejora de la recuperación metalúrgica operativa de la cal.

4.4. Evaluando la rentabilidad operativa de la cal habiéndose minado la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho:

En este punto ha de realizarse un balance del costo y el beneficio de haber incluido el minado de la zona 3, ello con la finalidad de evaluar la rentabilidad operativa de la cal. Este balance tendrá como el “costo”, al aumento del costo de minado en un 11.95% en promedio; y al “beneficio” al incremento de la recuperación metalúrgica operativa de la cal en 10.53% en promedio. Véase este análisis en la siguiente tabla:

Tabla 4.21.: Rentabilidad operativa de la cal después de incluir a la zona 3.

Flujo de Caja Operativo	Año 2018			2019
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero
<i>Producción de cal</i>				
Cotización de la Cal (US\$/TM)	232	232	232	232
Tonelaje mensual (TM/mes):	61,004.56	59,756.45	61,076.74	61,038.91
Ley promedio (%CaCO ₃):	52.038	52.077	52.107	52.084
Recuperación Metalúrgica (%):	73.11%	72.85%	73.04%	72.78%
Ingreso por ventas US\$:	5,384,405.8	5,259,499.9	5,392,923.4	5,368,243.5
<i>Costos operativos</i>				
Costo por tonelada mina (US\$/TM):	3.738	3.684	3.728	3.704
Costo por tonelada planta (US\$/TM):	5.458	5.435	5.479	5.460
Costo total (US\$):	561,018.71	544,910.20	562,308.37	559,317.76
Utilidad Operativa US\$:	4,823,387.1	4,714,589.7	4,830,615.0	4,808,925.7

Fuente: Cal y Cementos Sur S.A.

Conforme a la tabla 4.21, la utilidad operativa en la cantera Ayacucho ha fluctuado de 4.71 millones de US\$ hasta 4.83 millones de US\$, es decir, un promedio de 4.79 millones de US\$.

A: Validación de la solución del modelo matemático:

Si bien en la solución del modelo matemático se proyectaba un rentabilidad operativa de US\$ 4'677,291.04; la rentabilidad operativa real, después de haberse minado y procesado la roca caliza de la zona 3 en conjunto a la zona 1 y 2, ha sido distinta. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.22.: Variación de la utilidad operativa proyectada/operativa.

Utilidad Operativa con la zona 3 (zona 1 + 2 y 3):	Año 2018			2019	Promedio
	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
Lograda por OP (US\$)	4,823,387.14	4,714,589.71	4,830,615.03	4,808,925.72	4,794,379.40
Target por MM (US\$)	4,677,291.04	4,677,291.04	4,677,291.04	4,677,291.04	4,677,291.04
% de variación:	3.12%	0.80%	3.28%	2.81%	2.50%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

De acuerdo a la tabla 4.22, si existe una diferencia entre la utilidad operativa proyectada en la solución matemática del modelo y la utilidad operativa lograda con operaciones mina y procesamiento. Si bien, la recuperación metalúrgica ha sido 10.53% en promedio más que la recuperación metalúrgica utilizada en el modelo matemático; los costos de minado operáticos también fueron 11.95% en promedio más que los costos proyectados y utilizados en el modelo matemático; esto nos da un balance final de que la utilidad operativa lograda fue US\$ 4'794,379.40; es decir, 2.50% más que la utilidad operativa proyectada que era US\$ 4'677,291.04.

Este buen resultado: Valida la Solución del Modelo Matemático de la Cantera Ayacucho.

B: Balance entre la rentabilidad operativa de la zona 1 y 2 con y sin la zona 3:

Incluir la producción de caliza kárstica de la zona 3, hizo que los costos de minado aumentaran, pero también, hizo que la recuperación metalúrgica mejore. Al comparar la rentabilidad operativa de la zona 1 y 2 con la rentabilidad de la zona 1, 2 y 3; el resultado es aún mejor. Véase la siguiente tabla:

Tabla 4.23.: Análisis comparativo de la rentabilidad operativa con y sin la zona 3.

Meses operativos Antes de:	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Promedio
Meses operativos Después de:	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	
A: UO - Zona 1 y 2 (US\$)	4,023,404.79	4,019,590.80	4,184,477.92	4,061,094.47	4,072,141.99
D: UO - Zona 1, 2 y 3 (US\$)	4,823,387.14	4,714,589.71	4,830,615.03	4,808,925.72	4,794,379.40
% de variación:	19.88%	17.29%	15.44%	18.41%	17.74%

Fuente: Cal y Cementos Sur.

Según la tabla 4.23, existe una mejora relevante entre la utilidad operativa de la zona 1 y 2 (antes) y la utilidad operativa de la zona 1, 2 y 3 (después) que asciende a un 17.74% en promedio, es decir, una incremento de US\$ 4'072,141.99 a US\$ 4'794,379.40; lo cual indica que: “La rentabilidad operativa de cal si se logró optimizar”.

Ahora en un contexto de balance global se ha tenido el resultado como se puede ver en la siguiente imagen:

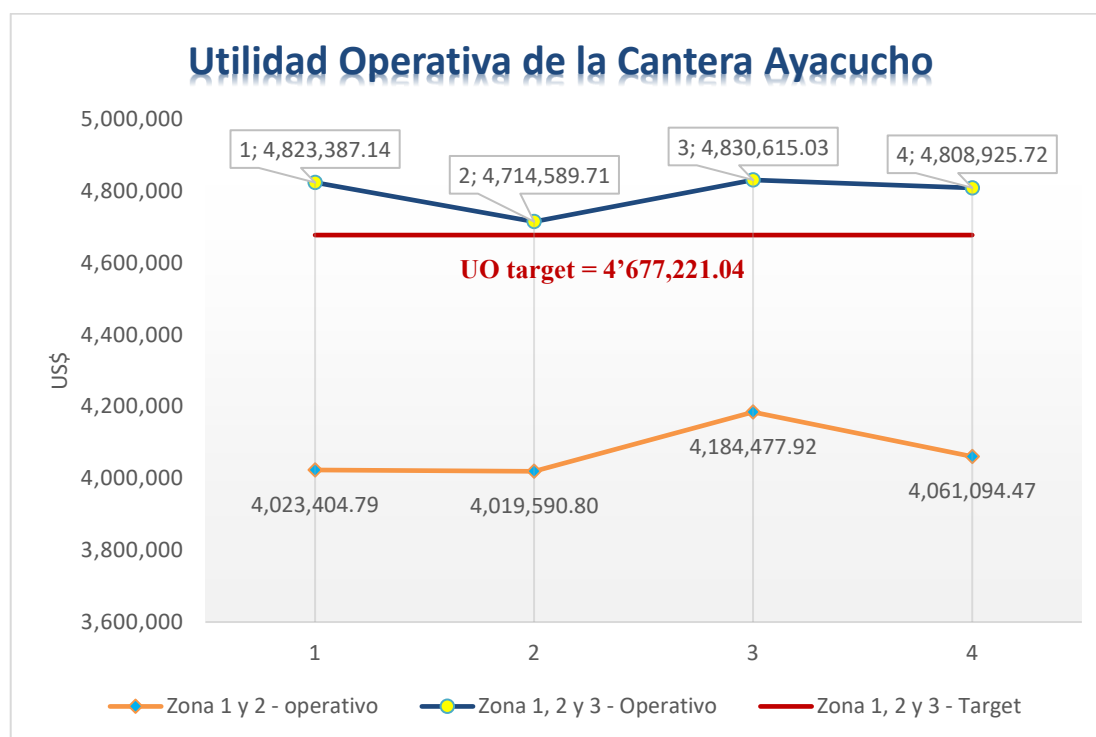


Figura 4.13: Análisis comparativa de las utilidades operativas.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

En la figura 4.13, se puede apreciar que la utilidad operativa de la zona 1, 2 y 3 está por encima del target y es muy superior a la utilidad operativa cuando solo se minaba la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho.

Por lo tanto: Al incluir el minado de la zona 3 conjuntamente con la zona 1 y 2, si logró optimizar la rentabilidad de la cal que había disminuido tras la caída de la recuperación metalúrgica. Así pues, aunque minar caliza kárstica de la zona 3 implicó un incremento en los costos de minado que ascendieron a un 11.95% en promedio; es la

recuperación metalúrgica de la cal, el cual mejora en un 10.53% en promedio, quien optimiza la rentabilidad operativa de la cal; ya que el tonelaje procesado en planta no presento en ningún momento cambios relevantes. Véase la siguiente imagen:

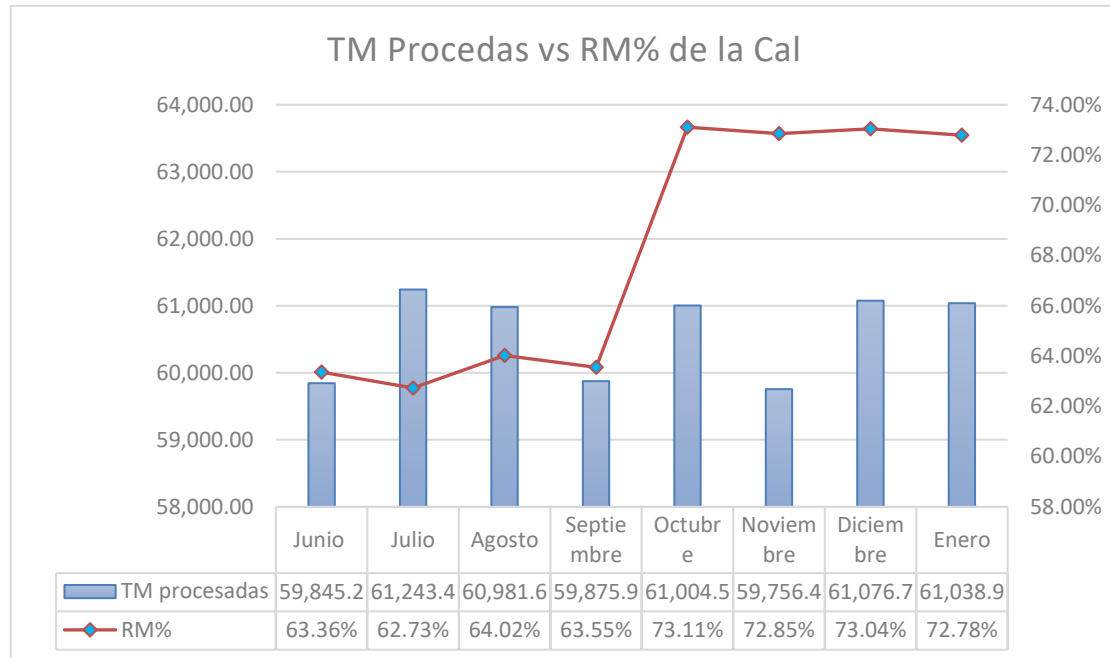


Figura 4.14: Fluctuación de las toneladas procesadas versus la RM%.

Fuente: MineSight, Cal y Cementos Sur.

En la figura 4.14, se puede apreciar que la recuperación metalúrgica mejora a partir de octubre del 2018, mientras que, el tonelaje procesado en planta prosigue con una fluctuación normal.

4.5. Discusión de los Resultados:

Los resultados obtenidos en esta investigación se discutirán con respecto a los antecedentes que guiaron esta investigación, teniéndose lo siguiente:

Respecto a Condori (2013): en donde se redujo los costos de minado al incluir el sistema Dispatch, en especial los costos de carguío y transporte; en esta investigación al incluir el minado de la zona 3 se incrementaron los costos de minado en un 11.95% en promedio, esto debido a la operación carguío y transporte, y servicios auxiliares; ya que

la zona 3 es una zona más alejada y sus tajos están más dispersos que los de la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho. No obstante, minar la zona 3 ha sido una decisión acertada pues, operativamente permitió mejorar la recuperación metalúrgica de la cal que había disminuido hasta 63.42% en promedio y logrando una alza de 72.95% en promedio, es decir, se obtuvo una mejora de 10.53% en promedio.

Respecto a Cuentas (2012): en donde se construyó un modelo matemático para el Sindicato Minero Pacococha S.A y en el que se proyectó una rentabilidad de US\$ 18,446.15 por día. El modelo matemático construido para la cantera Ayacucho posee la misma estructura con varias diferencias, que tras la solución obtenida con Solver, se proyectó una rentabilidad operativa de US\$ 4'677,291.04 por mes. Empero, la utilidad operativa lograda fue US\$ 4'794,379.40; es decir, 2.50% en promedio más que la proyectada. Sin embargo, lograr ello, necesito que la solución matemática sea derivada a un plan de minado y seguida/controlada en operaciones mina de la cantera Ayacucho.

Respecto a Alvear, López, Pindo y Proaño (2011): en donde se evaluó el contar con un sistema de carguío y transporte clásico (minado por circuito) versus un transporte por gravedad (minado por gravedad), eligiéndose el minado por gravedad por mejor VAN y TIR; en esta investigación no se evalúa el VAN y el TIR pues estos indicadores financieros son utilizados en el largo plazo. No obstante, si evalúa mejorar la rentabilidad operativa incluyendo el minado de la zona 3. Si bien esta decisión hizo que se incrementaran los costos de minado, también permitió mejorar la recuperación metalúrgica de la cal, y dentro de un balance de costo beneficio la utilidad operativa al minar la zona 1, 2 y 3 fue de US\$ 4'794,379.40; lo cual optimizo la rentabilidad operativa de cal en un 17.74% en promedio más que la utilidad operativa de la zona 1 y 2 la cual era US\$ 4'072,141.99 en promedio.

CONCLUSIONES

El modelo matemático construido para la Cantera Ayacucho y resuelto con el software Solver – Excel; determinó minar 18,135.00 TM/mes con una ley promedio de 49.5% CaCO₃ de caliza masiva negra de la zona 1; 4,785.63 TM/mes con una ley promedio de 51.36% CaCO₃ de caliza kárstica de la zona 2, y 37,529.38 TM/mes con una ley promedio de 53.28% CaCO₃ de caliza kárstica de la zona 3. Teniéndose con ello, una distribución de la producción de 30% para la zona 1, 8% para la zona 2 y 62% para la zona 3; con lo cual se proyectó una rentabilidad operativa de US\$ 4'677,291.04 por mes.

Al minarse más del 70% de caliza kárstica de la zona 3; los costos de minado se incrementaron en un 11.95% en promedio más en la cantera Ayacucho; no obstante, la recuperación metalúrgica de la cal se mejoró en un 10.53% en promedio; ello minando y procesando las mismas toneladas de mineral que cuando solo se minaba roca caliza de zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho.

La utilidad operativa al minar roca caliza de la zona 1, 2 y 3 de la cantera Ayacucho ascendió a US\$ 4'794,379.40; siendo 2.50% mayor que la utilidad operativa proyectada que era US\$ 4'677,291.04; y siendo 17.74% en promedio más que la utilidad operativa cuando solo se minada roca caliza de la zona 1 y 2, el cual era US\$ 4'072,141.99. Con ello se concluye que, la rentabilidad operativa de cal si se logró optimizar al incluir el minado de la zona 3 en conjunto de la zona 1 y 2 de la cantera Ayacucho en Cal y Cementos Sur – Caracoto.

RECOMENDACIONES

Si bien el conocimiento empírico es fundamental en la toma de decisiones operacionales dentro de la industria minera; es siempre recomendable apoyarse en la investigación de operaciones cuando el problema puede presentar más de 1 solución factible; pues guiarse solo por el parecer y experiencias pasadas, podría no ser suficiente. Así pues, si por algún motivo las condiciones operativas cambian dentro de la cantera Ayacucho, es necesario realizar un nuevo modelo matemático para encontrar una nueva solución que pueda proporcionar un camino numérico mejor fundamentado.

La recuperación metalúrgica y los costos de minado repercuten mucho en la rentabilidad operativa mensual de una mina, así pues, procurar una mejor recuperación metalúrgica puede implicar un gran sacrificio operacional que puede incrementar sus costos operativos. Para tener un buen balance, es recomendable seguir utilizando diversas herramientas; así como los usados dentro de este estudio, siendo estos: la investigación de operaciones para construir un modelo, el software Solver para solucionar el modelo, el software MineSight para realizar el plan de minado derivado de la solución del modelo matemático, y la herramienta Haulage en carguío y transporte para mitigar el impacto en los costos de minado. Si es necesario agregar otros o también reemplazarlos por otros mejores.

Realizar cambios operativos, mayores inversiones, innovaciones tecnológicas y otros no deben verse como una amenaza, sino como una oportunidad de mejora. Se recomienda por ello, ante un problema determinado explorar distintas alternativas; así pues, en la cantera Ayacucho se logró optimizar la rentabilidad operativa al incluir la zona 3, la cual era más lejana, era más dispersa e iba implicar mayores esfuerzos operativos y por ende costos. No obstante, se logró un buen balance aplicando técnicas y tecnologías que implican una inversión, pero que generan una gran retribución.

REFERENCIAS

- Alvear, C., López, M., Pindo, J., & Proaño, G. (2011). *Diseño y Análisis Económico de la Explotación a Cielo Abierto de un Yacimiento de Caliza* (tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Anchorena, A. E. (2015). *Modelo Predictivo de Fragmentación y su Aplicación en una Matriz de Decisión*. Arequipa, Perú: Instituto de Ingenieros de Minas del Perú - PERUMIN.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid, España: E.T.S. De Ingenieros de Minas de Madrid.
- BS Consultores. (2009). *Planificación Minera de Superficie y Subterránea*. Santiago de Chile: Maestría Internacional en Ingeniería de Minas.
- Bustillo, M., & López, C. (1997). *Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras*. Madrid: Entorno Gráfico, S.L.
- Condori, R. A. (2013). *Reducción de Costos mediante La Optimización del Planeamiento a Corto Plazo en la Unidad Minera Pampa de Cobre* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Cuentas, M. S. (2012). *Research of Mining Operations*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano - Puno.
- Durant, J. (2010). *Ingeniería de Costos*. Puno, Perú: Universidad Nacional del Altiplano - Puno.
- EXSA S.A. (2011). *Manual Práctico de Voladura*. Lima, Perú: S.E.
- Guerrero, C. J. (2001). *Rocas Calizas*. Mixteca, México: Universidad Tecnológica de Mixteca.
- Herrera, J. H. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006). *Open Pit Mine Planning & Design*. London, UK.: CRC Press/Balkema.
- Iquiapaza, C. H. (2018). *Replanteo de Polígonos de Extracción para Optimizar el Proceso de Minado en Mina Toquepala* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú.
- Mathur, K., & Solow, D. (1996). *Investigación de Operaciones*. México: Prentice-Hall Hispanoamerica S.A.

- MI57E - Explotación de Minas. (2007). *Carguío y Transporte - Clase 2*. Santiago de Chile - Chile: Universidad de Chile.
- Morales, N. (2011). *Planificación Minera de Corto Plazo para Cielo Abierto*. Santiago de Chile: Advanced Mining Technology Center - Delphos.
- MVCS. (2009). *Elementos para la Determinación del Costo Horario de Los Equipos y Las Maquinarias del Sector Construcción*. Iquitos, Perú: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento del Perú.

ANEXOS