



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS

PLANIFICACIÓN DE BLOCK CAVING CONFIGURADO POR
MACRO BLOQUES CONSIDERANDO COSTOS FIJOS Y COSTOS
VARIABLES

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
MINERIA

ROBERTO DAVID CUEVAS MORA

PROFESOR GUÍA:

NELSON MORALES VARELA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

ERNESTO ARANCIBIA VILLEGAS

MARCOS FELIPE BARBOZA ROCO

PIERRE NANCEL PENARD

SANTIAGO DE CHILE

2021

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL GRADO DE: MAGÍSTER EN MINERÍA
POR: ROBERTO DAVID CUEVAS MORA
FECHA: JUNIO 2021
PROF. GUÍA: NELSON MORALES VARELA**

**PLANIFICACIÓN DE BLOCK CAVING CONFIGURADO POR MACRO BLOQUES
CONSIDERANDO COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES**

El cálculo de reservas en Block Caving se basa fundamentalmente en parámetros técnicos y económicos fijos, es decir, sin considerar la variabilidad que pudiera existir en los costos durante la ejecución del proyecto.

Teniendo en cuenta que los costos afectan la valorización de los bloques y por lo tanto la altura de columna óptima en un Block Caving, resulta necesario evaluar si un análisis más detallado de los mismos pudiera en efecto cambiar las reservas mineras.

Basado en lo anterior, en este trabajo se desarrolla y evalúa el impacto que tienen los costos fijos y variables en la planificación de Block Caving. La metodología propuesta para este trabajo es el separar detalladamente los costos de operación en costos fijos y costos variables (es decir, dependientes del tonelaje de producción). El modelamiento se lleva a cabo mediante la herramienta de agendamiento UDESS, la cual permite generar los planes de producción tanto para la metodología propuesta como un caso base desarrollado mediante la metodología tradicional y así poder comparar ambos casos.

Al aplicarse la metodología propuesta sobre un caso de una operación real, se observa que el plan de producción propuesto no representa un incremento significativo en su valor económico (+1.25%), sin embargo, exhibe una ley de corte ligeramente inferior (0.006%), lo cual se traduce en 5 millones de toneladas adicionales y un período de producción extra (21 en vez de 20 años).

**ABSTRACT OF THE TESIS TO OBTAIN THE
GRADE OF: MASTER'S IN MINING ENGINEERING
BY: ROBERTO DAVID CUEVAS MORA
DATE: JUNE 2021
THESIS ADVISOR: NELSON MORALES VARELA**

**BLOCK CAVING PLANNING CONFIGURED BY MACRO BLOCKS CONSIDERING
FIXED COSTS AND VARIABLE COSTS**

The calculation of reserves in Block Caving is fundamentally based on fixed technical and economic parameters, that is, without considering the variability that may exist in costs during project execution.

Bearing in mind that costs affect the valuation of the blocks and therefore the optimal column height in a Block Caving, it is necessary to assess whether a more detailed analysis of them could in effect change the mineral reserves.

Based on the above, this work develops and evaluates the impact of fixed and variable costs on Block Caving planning. The proposed methodology for this topic is to separate operating costs in detail into fixed costs and variable costs (that is, dependent on the production tonnage). The modeling is carried out using the UDESS scheduling tool, which allows the generation of production plans for both the proposed methodology and a base case developed using the traditional methodology and thus being able to compare both cases.

When applying the proposed methodology on a case of a real operation, it is observed that the proposed production plan does not represent a significant increase in its economic value (+ 1.25%), however, it exhibits a slightly lower cut-off grade (0.006%), which translates into an additional 5 million tons and an extra production period (21 instead of 20 years).

Dedicatoria

Durante la estancia fuera de casa se han venido muchos retos y decisiones importantes, partiendo desde los 16 años hacia un Centro Estatal de Alto Rendimiento para pulir mis cualidades en deportes como ciclismo y atletismo además de continuar los estudios de preparatoria. A los 17 años continuamos entrenando y estudiando simultáneamente; pero ahora enfocando los estudios en una Ingeniería Civil, ese tiempo sí que fue difícil, pero al igual que en la etapa anterior siempre hubo familiares y amigos apoyándome. Con forme fue pasando el tiempo tuvimos que tomar una decisión muy importante entre concluir los estudios o continuar entrenando mis deportes favoritos, tomando como decisión final enfocarme en concluir la Ingeniería y continuar haciendo deporte, pero a manera de hobby.

Durante la subida de los precios de los metales a inicios del 2010, tomamos otra importante decisión la cual fue soportada por mis padres para iniciar una segunda carrera Ingeniería de Minas. Con apoyo de mis padres y amigos en el 2013 concluimos ambas carreras, además de adquirir experiencia en la carrera de Ingeniería Civil. En el 2013 obtuve mi primer empleo como ingeniero minero en una de las mejores empresas mexicanas en minería.

Pareciera que ese era el último escalafón importante dentro de mi vida, pero aun seguía con la incertidumbre de si aún podía seguir escalando. Hasta que surgió una oportunidad para poder elevar mi grado de estudios. Durante toda mi vida he tomado decisiones arriesgadas, pero esta incluía algo especial y era lo siguiente, seguir mis sueños preparándome académicamente estudiando un Magister en Minería o cambiarlos por un trabajo estable y olvidar todo, esta si que fue una decisión difícil.

Pero como siempre ahí estaban mis padres, amigos y ahora también mi esposa e hijo los cuales me apoyaron y motivaron haciéndome dos preguntas ¿Qué es lo que quieres? ¿Qué es lo que vas a hacer para lograrlo? Tomando como decisión final dejar mi trabajo estable y mi zona de confort para cumplir lo que realmente quería.

Este trabajo está dedicado a mis padres, amigos y personas que influyeron en mí de una buena manera y que formaron el carácter de la persona que ahora soy.

¡La vida es un riesgo y el que no arriesga no gana!

Agradecimientos

Hay muchas personas a quien agradecer, las cuales nos aconsejaban y nos apoyaban en los momentos difíciles para poder llevar a cabo este trabajo.

Quiero agradecer a mi padre Esteban y a mi madre Antonia que siempre estuvieron ahí para apoyarme en los momentos difíciles y siempre recalando que no me rindiera.

A mi esposa y madre de mi hijo Ana Isabel, que me acompañó a vivir una nueva aventura al extremo sur del continente americano; apoyándome incondicionalmente en los momentos buenos y en los momentos malos para poder concluir la meta propuesta.

A mi amigo chileno Omar Chandia y a su esposa Olivier Erives que siempre estuvieron ahí apoyando a mi esposa, mi hijo David y a mí durante toda la estancia en Chile, invitándonos a convivir y pasar buenos ratos en compañía de su familia para despejarnos del estrés académico y financiero.

A Nelson Morales y a Ernesto Arancibia por su apoyo, tiempo y dedicación hacia mi para poder avanzar en este trabajo hasta concluirlo.

A la tía Meli de México, Katy y Maxito, unos grandes amigos que nos apoyaron con nuestro pequeño David mientras nosotros trabajábamos o estudiábamos, por esa convivencia tan agradable que hizo más amena la estancia en Chile.

A Enrique Jelvez por extender la mano desde que coincidimos, siempre empujando a que concluyera mis estudios, debido a que el sabía todo lo que había batallado, sufrido y sacrificado para llevar a cabo los estudios; indicando que no dejará en vano todo el esfuerzo.

A todos los integrantes del Laboratorio de Planificación Minera “DELPHOS” Espejo, Diego, Pierre, Christoper, Nelis, Orellana, Valentina, Gerson, Emilio, Hector, Consuelo, Maximiliano, Fabian, Nick, El Chino, Manuel y Walter quienes compartieron su conocimiento y herramientas para desarrollar el trabajo.

A Arcasa Propiedades que tuvo la confianza de arrendar el departamento a mi esposa, mi hijo y a mí, provenientes del extranjero apenas teniendo un día de haber llegado a Chile, ya que sin su confianza no sabríamos que habría pasado.

Y en especial a mis amigos y compañeros Marcos Barboza, David Meneses y Mauricio Soto por enseñarme y presionarme durante muchos días de desvelo para seguir adelante con los ramos del Magister hasta poder concluirlos. Por todas esas ocurrencias, fechas y aventuras que pasamos juntos, las cuales me gustaría repetir a futuro.

Índice

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.- OBJETIVO GENERAL	2
1.2.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3.- ALCANCES	3
1.4.- METODOLOGÍA.....	3
2.- ANTECEDENTES	5
2.1.- INTRODUCCIÓN A LA PLANIFICACIÓN MINERA A LARGO PLAZO	5
2.2.- DESCRIPCIÓN DE LA PLANIFICACIÓN TRADICIONAL	5
2.3.- MINERÍA SUBTERRÁNEA	6
2.3.1.- Auto soportados.....	6
2.3.2.- Soportados artificialmente.....	6
2.3.3.- De hundimiento	7
2.4.- BLOCK CAVING.....	7
2.4.1.- Block Caving Explotado por Macro Bloques.....	8
2.4.2.- Planificación en Block Caving	10
2.4.3.- Piso económico en Block Caving.....	11
2.4.4.- Envolverte económica en Block Caving.....	11
2.4.5.- Velocidad de Extracción.....	12
2.5.- GUROBI Y AGENDADOR UDESS	13
2.5.1.- Paquete computacional Gurobi.....	13
2.5.2.- Programación Lineal	14
2.5.3.- Programación Entera-Mixta	14
2.6.- SECUENCIADOR Y AGENDADOR UDESS	15
2.6.1.- Actividades	15
2.6.2.- Precedencias	15
2.6.3.- Función objetivo.....	15
2.6.4.- Restricciones.....	15
2.6.5.- Restricción de recurso operacional.....	15
2.6.6.- Inicio de restricción de capacidad de recurso.....	16
2.6.7.- Restricción límite de progreso.....	16
2.6.8.- Restricción de rango de recurso	16
2.6.9.- Restricción de incompatibilidad de actividad.....	16
2.6.10.- Restricción de inicio de periodo	16
3.- COSTOS EN BLOCK Y PANEL CAVING	17
3.1.- ESTRUCTURA DE COSTOS	17
3.1.1.- Costos Fijos	17
3.1.1.1. Personal de Supervisión.....	18
3.1.1.2. Equipos de Operación	18

3.1.1.3. Bombeo de Agua	18
3.1.1.4. Administrativos.....	18
3.1.2.- Costos Variables.....	18
3.1.2.1. Ventilación.....	19
3.1.2.2. Actividades Auxiliares.....	20
3.1.3.- Enfoque de Estructura de Costos.....	20
3.1.4.- Discretización de reservas	26
4.- METODOLOGÍA	27
4.1.- PISO ECONÓMICO	27
4.2.- DISCRETIZACIÓN DEL PISO ECONÓMICO EN MACRO BLOQUES	27
4.3.- DETERMINAR LA ENVOLVENTE ECONÓMICA CONSIDERANDO EL COSTO DE OPERACIÓN COMO UNA VARIABLE FIJA	28
4.4.- DETERMINAR LA ENVOLVENTE ECONÓMICA DESGLOSANDO EL COSTO DE OPERACIÓN EN COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES	29
4.5.- RESTRICCIONES DE PRECEDENCIAS	29
4.5.1.- Restricción de precedencias horizontales.....	29
4.5.2.- Restricción de precedencias verticales	30
4.6.- METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL AGENDAMIENTO DE EXTRACCIÓN CON LA HERRAMIENTA UDESS	31
5.- CASO DE ESTUDIO.....	33
5.1.- DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA Y GEOTÉCNICA	34
5.2.- PISO ECONÓMICO.....	35
5.3.- LÍMITES DEL PISO ECONÓMICO	35
5.4.- DISCRETIZACIÓN DEL PISO ECONÓMICO EN BLOCK CAVING.....	36
5.5.- CÁLCULO DE ENVOLVENTE ECONÓMICA	38
5.5.1.- Valorización de reservas en Macro Bloques	38
5.5.2.- Cálculo del tonelaje en las Unidades Básicas de Extracción.....	39
5.5.3.- Ley media de cobre en las Unidades Básicas de Extracción.....	40
5.5.4.- Valorización de Beneficio en las Unidades Básicas de Extracción.....	40
5.5.5.- Resumen de valorización y envolventes de Macro Bloques	40
5.6.- VELOCIDADES DE EXTRACCIÓN	41
5.7.- RESTRICCIONES ADICIONALES.....	43
5.7.1.- Restricciones de capacidad.....	43
5.7.2.- Restricciones de infraestructura.....	44
5.8.- SECUENCIA DE MINADO DE MACRO BLOQUES.....	44
5.9.- AGENDAMIENTO OPTIMO DE EXTRACCIÓN EN UDESS.....	45
5.9.1.- Archivos de Actividades y Precedencias.....	45
6.- ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
6.1.- ANÁLISIS DE ALTURAS DE ENVOLVENTE POR MACRO BLOQUE.....	47

6.2.- AGENDAMIENTO DE LOS MACRO BLOQUES INDIVIDUALMENTE EN SU ETAPA DE PRODUCCIÓN POR METODOLOGÍA	47
6.3.- DURACIÓN DE LOS MACRO BLOQUES EN EL AGENDAMIENTO.....	55
6.4.- ANÁLISIS DEL AGENDAMIENTO	56
7.- CONCLUSIONES	60
7.1.- PLANIFICACIÓN MINERA EN BLOCK CAVING EXPLOTADO POR MACRO BLOQUES	60
7.2.- METODOLOGÍAS PARA INCORPORAR LOS COSTOS DE MINADO A LA PLANIFICACIÓN.....	60
7.3.- CASO DE ESTUDIO	60
8.- ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	62
9.- ANEXOS.....	64
9.1.- ANEXO A: CURVAS TONELAJE LEY DE PIT FINAL.....	64
9.2.- ANEXO B: CURVAS TONELAJE LEY DE MACRO BLOQUES.....	64
9.3.- ANEXO C: VALORIZACIÓN DE MACRO BLOQUES DESGLOSADO POR UBE	72
9.4.- ANEXO D: RESUMEN DE VALORIZACIÓN DE MACRO BLOQUES	88
9.5.- ANEXO D: ARCHIVOS DE PRECEDENCIAS UTILIZADOS EN LAS OPTIMIZACIONES CON EL SOFTWARE UDESS.....	89

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Metodología.....	4
Ilustración 2 Proceso de planificación.....	6
Ilustración 3 Esquema tradicional de un Block Caving en vista isométrica y sección (Brown [11]).	7
Ilustración 4 Esquema de una mina de Block Caving, vista en planta.....	8
Ilustración 5 Esquema de un Block Caving explotado por Macro Bloques, vista perfil y planta (Fuentes et al [3]).....	9
Ilustración 6 Diagrama de planificación para minas de Block Caving (Rubio [6]).	11
Ilustración 7 Piso económico de División El Teniente, Codelco Chile.	11
Ilustración 8 Envolvente económica de un modelo de recursos geológicos (Vargas. [2]).....	12
Ilustración 9 Metodología de resolución de Gurobi considerando un GAP (Rocher [8])......	14
Ilustración 10 Vista en planta de un Block Caving donde se observa una disminución de área que entrega producción.	21
Ilustración 11 Unidad Básica de Extracción (UBE) compuesta por bloques.....	22
Ilustración 12 Etapas de régimen y ramp down de un plan minero.	23
Ilustración 13 Vista en planta de un Block Caving donde se observa la disminución del área que entrega producción.	24
Ilustración 14 Ábaco de Laubscher que define radio hidráulico a partir de valores de MRMR. ..	28
Ilustración 15 Secuencia de minado horizontal de macro bloques contenidos en el piso económico.	30
Ilustración 16 Vista en sección de un macro bloque dividido en UBE's mostrando las restricciones de precedencias verticales.	31
Ilustración 17 Modelo de recursos geológico con escala de colores según su ley media de cobre.	34
Ilustración 18 Piso económico del modelo de recursos geológicos delimitado por una ley de corte, color "Azul" área sobre la ley de corte y color "Rojo" área debajo de la ley de corte.....	36
Ilustración 19 Determinación de radio hidráulico adecuado para generar la hundibilidad en un macro bloque (línea verde), utilizando como parámetro de entrada un MRMR 50.....	37
Ilustración 20 Distribución espacial de los macro bloques contenidos en el piso económico.	38
Ilustración 21 Macro bloque compuesto por UBE's	39
Ilustración 22 Macro bloque con cortes a cada 20 metros donde se delimita en color "Azul" el área que entrega producción.....	42
Ilustración 23 Distribución espacial de macro bloques contenidos dentro del piso económico y escala de color de ley de cobre, color "Verde" representa las leyes más altas y el color "Rojo" representa las leyes más bajas.	44
Ilustración 24 Secuencia de minado de macro bloques.....	45
Ilustración 25 Descripción gráfica de precedencias.	46

Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros técnico económicos.	22
Tabla 2 Valorización de reservas de un Block Caving agrupadas en UBE utilizando la primera metodología.	23
Tabla 3 Costo de operación desglosado en costos fijos y costos variables.	25
Tabla 4 Valorización de reservas de un Block Caving agrupadas en UBE utilizando la segunda metodología.	26
Tabla 5 Características del modelo de recursos geológicos.	33
Tabla 6 Dimensiones de macro bloques y su radio hidráulico.	37
Tabla 7 Alturas de columna de macro bloques y velocidades de extracción utilizadas.	43
Tabla 8 Sección de archivo de actividades.	46
Tabla 9 Sección de archivo de precedencias.	46
Tabla 10 Periodo de inicio de minado (I), Periodo de terminación de minado (T) y Duración de la producción de los macro bloques (D).	55
Tabla 11 Resumen de valorización de reservas extraídas, ley media de cobre y beneficio por metodología.	59
Tabla 12 Valorización de MB_1 considerando Costo de Operación como una variable fija.	72
Tabla 13 Valorización de MB_2 considerando Costo de Operación como una variable fija.	73
Tabla 14 Valorización de MB_3 considerando Costo de Operación como una variable fija.	73
Tabla 15 Valorización de MB_4 considerando Costo de Operación como una variable fija.	73
Tabla 16 Valorización de MB_5 considerando Costo de Operación como una variable fija.	74
Tabla 17 Valorización de MB_6 considerando Costo de Operación como una variable fija.	74
Tabla 18 Valorización de MB_7 considerando Costo de Operación como una variable fija.	75
Tabla 19 Valorización de MB_8 considerando Costo de Operación como una variable fija.	75
Tabla 20 Valorización de MB_9 considerando Costo de Operación como una variable fija.	75
Tabla 21 Valorización de MB_10 considerando Costo de Operación como una variable fija.	76
Tabla 22 Valorización de MB_11 considerando Costo de Operación como una variable fija.	77
Tabla 23 Valorización de MB_12 considerando Costo de Operación como una variable fija.	77
Tabla 24 Valorización de MB_13 considerando Costo de Operación como una variable fija.	78
Tabla 25 Valorización de MB_14 considerando Costo de Operación como una variable fija.	79
Tabla 26 Valorización de MB_15 considerando Costo de Operación como una variable fija.	79
Tabla 27 Valorización de MB_1 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.	80
Tabla 28 Valorización de MB_2 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.	81
Tabla 29 Valorización de MB_3 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.	81
Tabla 30 Valorización de MB_4 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.	81
Tabla 31 Valorización de MB_5 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.	82

Tabla 32 Valorización de MB_6 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	82
Tabla 33 Valorización de MB_7 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	83
Tabla 34 Valorización de MB_8 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	83
Tabla 35 Valorización de MB_9 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	84
Tabla 36 Valorización de MB_10 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	84
Tabla 37 Valorización de MB_11 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	85
Tabla 38 Valorización de MB_12 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	86
Tabla 39 Valorización de MB_13 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	86
Tabla 40 Valorización de MB_14 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	87
Tabla 41 Valorización de MB_15 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	88
Tabla 42 Resumen de valorización económica de macro bloques considerando el Costo de Operación como una variable fija.....	88
Tabla 43 Resumen de valorización económica de macro bloques desglosando el Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	89
Tabla 44 Archivo de precedencias considerando Costo de Operación como una variable fija.....	95
Tabla 45 Archivo de precedencias desglosando el Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.....	102

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Comportamiento del costo variable en función del área que entrega producción.....	19
Gráfica 2 Curva Tonelaje Ley del modelo de recursos geológicos.....	33
Gráfica 3 Curva Tonelaje Ley de reservas con potencial para ser minadas mediante Block Caving.	34
Gráfica 4 Valorización de piso económico.....	35
Gráfica 5 Alturas de envolventes y valores económicos de macro bloques considerando el costo de operación como fijo.....	41
Gráfica 6 Alturas de envolventes y valores económicos de macro bloques desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables.....	41
Gráfica 7 Altura de columna en macro bloques según su metodología.....	47
Gráfica 8 Plan de producción de macro bloque 1 según su metodología.....	48
Gráfica 9 Plan de producción de macro bloque 2 según su metodología.....	48
Gráfica 10 Plan de producción de macro bloque 3 según su metodología.....	48
Gráfica 11 Plan de producción de macro bloque 4 según su metodología.....	49
Gráfica 12 Plan de producción de macro bloque 5 según su metodología.....	49
Gráfica 13 Plan de producción de macro bloque 6 según su metodología.....	49
Gráfica 14 Plan de producción de macro bloque 7 según su metodología.....	50
Gráfica 15 Plan de producción de macro bloque 8 según su metodología.....	50
Gráfica 16 Plan de producción de macro bloque 9 según su metodología.....	51
Gráfica 17 Plan de producción de macro bloque 10 según su metodología.....	51
Gráfica 18 Plan de producción de macro bloque 11 según su metodología.....	51
Gráfica 19 Plan de producción de macro bloque 12 según su metodología.....	52
Gráfica 20 Plan de producción de macro bloque 13 según su metodología.....	52
Gráfica 21 Plan de producción de macro bloque 14 según su metodología.....	53
Gráfica 22 Plan de producción de macro bloque 15 según su metodología.....	53
Gráfica 23 Plan de producción entregado por la primera metodología que considera el Costo de Minado como una variable determinista, compuesto por 15 macro bloques.....	57
Gráfica 24 Plan de producción entregado por la segunda metodología que desglosa el Costo de Minado en Costos Fijos y Costos Variables, compuesto por 15 macro bloques.....	58
Gráfica 25 Curva Tonelaje Ley de Pit Final.....	64
Gráfica 26 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 1.....	64
Gráfica 27 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 2.....	65
Gráfica 28 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 3.....	65
Gráfica 29 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 4.....	66
Gráfica 30 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 5.....	66
Gráfica 31 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 6.....	67
Gráfica 32 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 7.....	67
Gráfica 33 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 8.....	68
Gráfica 34 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 9.....	68
Gráfica 35 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 10.....	69

Gráfica 36 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 11.....	69
Gráfica 37 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 12.....	70
Gráfica 38 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 13.....	70
Gráfica 39 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 14.....	71
Gráfica 40 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 15.....	71

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1 Expresión de Beneficio utilizada en la primera metodología.....	21
Ecuación 2 Expresión de Beneficio utilizada en la segunda metodología.	24
Ecuación 3 Ecuación utilizada para el cálculo del tonelaje de las UBE.....	39
Ecuación 4 Ecuación utilizada para el cálculo de la ley media cobre en las UBE.....	40

1.- Introducción

La planificación minera es la rama de la ingeniería de minas que determina qué porción del yacimiento será extraído, cómo será extraído y cuando será procesado. Este es un proceso que está compuesto por las etapas de definición de la envolvente económica, ingeniería del proyecto, secuencia de explotación y su evaluación económica, determinando de esta manera el valor del negocio.

Dentro del contexto de planificación se pueden abordar tres tipos de horizontes, donde el largo plazo toma decisiones estratégicas para visualizar de manera general el negocio utilizando parámetros de entrada sin mucho detalle (rango de 20 a 30 años), por otro lado, el horizonte de mediano plazo alinea los objetivos del largo plazo con la realidad operacional, dando información más precisa de áreas específicas de mina, ya sea la extracción, el diseño, equipo necesario y su distribución (rango 1 a 5 años) y la planificación a corto plazo considera decisiones operativas que requiere parámetros más precisos y exactos yendo desde semanas a un año. (Osanloo et al. [31], Vargas [2]).

Actualmente la planificación minera es tradicionalmente aplicada mediante metodologías que consideran parámetros técnicos y económicos constantes para poder evaluar el beneficio del negocio. Algunos ejemplos pueden ser el precio del metal de interés, leyes y los costos incurridos por la operación para poder llevar a cabo el negocio minero.

Por otro lado, en los últimos años ha existido una disminución de las leyes medias de los yacimientos mineros, una disminución del precio de los metales y un constante aumento en los costos. Estas condicionantes hacen no rentables los métodos utilizados y entonces se deben buscar alternativas para poder explotar los recursos remanentes de manera rentable. Unos de los métodos con ritmos de producción elevados que pueden ser alternativa, son los métodos de minado por hundimiento, teniendo como referencias la mina Henderson en USA con un ritmo de producción de 32,000 [tpd], North Parkers en Australia con un ritmo de producción de 60,000 [tpd], El Teniente en Chile con un ritmo de producción de 140,000 [tpd], entre otras.

Para realizar una planificación eficiente es necesario conocer los parámetros involucrados dentro del método de minado; en este caso nos enfocaremos un Block Caving.

El método de explotación subterráneo Block Caving consiste minar cuerpos con una mineralización de tipo masiva, de grandes dimensiones y generalmente de baja ley. Para poder desarrollar este método es necesario generar una socavación de dimensiones adecuadas sobre el nivel de producción para generar el hundimiento de manera natural en el yacimiento. Una vez generada la socavación, se procede a extraer el mineral fragmentado por los puntos de extracción ubicados en el nivel de producción mediante equipos LHD. A medida que el material fragmentado es extraído por los puntos de extracción, el material superior colapsará llenando el vacío generado por la extracción. Entonces ocurrirá una propagación vertical del colapso en respuesta a la remoción continua de material fragmentado a través de los puntos de extracción que se encuentren en producción. La forma en que el material fragmentado se desplace, desde su posición inicial,

anterior a la minería, hasta su posición final en el punto de extracción, dependerá de diversos factores relativos a la geología, la geomecánica, el diseño minero y la estrategia de extracción que se adopte, y tendrá consecuencias importantes en el negocio minero. (Arancibia [16])

Este trabajo abordará la metodología de planificación en Block Caving explotado por macro bloques, partiendo de un modelo de recursos geológicos; en el cual se definirá la ubicación espacial del piso económico (Villa [14]), se discretizará el piso económico en macro bloques, se determinará su envolvente económica (Vergara [15]), se asignarán velocidades de extracción y se creará un agendamiento óptimo de extracción de reservas incluyendo un análisis de costos tomando en cuenta el nivel productivo de cada macro bloque.

Como trabajo final se pretende abordar el problema mediante dos metodologías, la primera metodología optimizará la secuencia de extracción de cada uno de los macro bloques contenidos en el piso económico valorizando las reservas con una función de beneficio que considerará un costo de operación fijo. Por otro lado, la segunda metodología optimizará la secuencia de extracción de cada uno de los macro bloques valorizando las reservas mediante una función de beneficio que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables, incorporando el efecto que los costos variables puedan sufrir si disminuye el nivel productivo del macro bloque que entregue producción. Una vez concluidas las optimizaciones, se realizará una comparación en términos de valor presente neto VPN, cantidad de reservas extraídas y tiempo de agotamiento de reservas.

1.1.- Objetivo general

El principal objetivo de esta tesis es desarrollar una metodología que incorpore el impacto que tienen los Costos Fijos y Costos Variables al momento de realizar un agendamiento óptimo de extracción mediante el método de Block Caving explotado por macro bloques considerando restricciones que satisfagan el método de minado.

1.2.- Objetivos específicos

- Definir el piso económico que maximice el valor presente neto considerando parámetros técnico económicos fijos.
- Determinar la envolvente económica del modelo de recursos geológicos en ambas metodologías.
- Realizar un agendamiento óptimo de extracción utilizando la metodología tradicional maximizando el valor del negocio.
- Realizar un agendamiento óptimo de extracción en base a costos que van variando en función de la capacidad extractiva del macro bloque.
- Realizar una comparativa entre las dos optimizaciones realizadas en términos de beneficio económico del negocio, cantidad de recursos extraído y tiempo de agotamiento de recursos.

1.3.- Alcances

- Este trabajo aborda únicamente el efecto que tienen los costos de operación dentro de una mina de Block Caving explotada por macro bloques, los cuales que serán impactados por el nivel productivo de cada macro bloque.
- La primera metodología considera parámetros técnico económicos constantes.
- La segunda metodología desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables, afectando el costo variable según el nivel productivo del macro bloque.
- El diseño y el piso económico se consideran constantes, alterando solo la envolvente económica de los macro bloques en la segunda metodología.
- El agendamiento de los macro bloques emplazados dentro del piso económico se considera constante en ambas metodologías.
- No se considera incertidumbre en ninguno de los parámetros técnico económicos utilizados.

1.4.- Metodología

La secuencia propuesta para desarrollar y validar el problema de esta tesis a grandes rasgos se describe a continuación y en la *Ilustración 1* se presenta su diagrama conceptual.

1. Trabajar con un modelo recursos geológicos que contenga las características de una mina que se encuentre en transición de cielo abierto a subterránea, el cual representa que aún se tienen recursos remanentes que podrían ser explotados mediante Block Caving.
2. Determinar ubicación del piso económico del modelo de recursos geológicos utilizando parámetros técnico económicos fijos.
3. Discretizar el piso económico en macro bloques de una dimensión adecuada en planta para poder generar el hundimiento.
4. En la primera metodología, determinar la envolvente económica de cada macro bloque considerando el costo de operación como fijo.
5. En la segunda metodología, determinar la envolvente económica de cada macro bloque desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables, impactando el costo variable en la valorización; si la capacidad extractiva del macro bloque disminuye.
6. Definir velocidades de extracción dependiendo de la altura de columna extraída.
7. Realizar un agendamiento óptimo de extracción de las reservas con ambas metodologías.
8. Desarrollar los planes de producción.
9. Determinar el valor presente neto del proyecto en ambas metodologías.
10. Comparar en términos del valor presente neto, cantidad de reservas extraídas y tiempo de agotamiento de las reservas en los planes de producción desarrollados.



Ilustración 1 Metodología.

2.- Antecedentes

2.1.- Introducción a la planificación minera a largo plazo

La planificación a largo plazo en la industria de la minería del cobre es un proceso complejo que establece políticas de extracción de mineral, un plan de inversión y un plan operativo para plantas de procesamiento. Este tipo de planes estratégicos deben especificar en tiempo y forma el procesamiento de cada tonelada de mineral, manteniendo una extracción constante que alimente al proceso cumpliendo los objetivos a mediano y largo plazo.

El objetivo de la planificación a largo plazo consiste en establecer un plan estratégico de la producción y la inversión que garantice un máximo rendimiento en el horizonte temporal de la mina, considerando puntos importantes como la estabilidad geomecánica, medio ambiente, factores operacionales, geología estructural, procesamiento, entre otras.

La tarea primordial consiste en elaborar un plan minero que defina los agendamientos de inversión, producción de mina y planta en todo el horizonte de la evaluación, incluyendo elementos tales como tecnología, insumos, métodos de procesamiento y el agendamiento de la extracción de cada tonelada de mineral. Teniendo como resultado información con suficiente detalle para verificar su consistencia y factibilidad. (Caro et al. [1])

El proceso la planificación a largo plazo debe encontrar soluciones a tres problemas principales:

- Producción del depósito mineral
- Selección, diseño y agendamiento de proyectos de inversión
- Estrategias de operación de planta.

2.2.- Descripción de la planificación tradicional

El proceso de planificación a largo plazo de la producción comienza con la exploración geológica de un depósito. Los datos recopilados se utilizan para construir un modelo de recursos geológicos, en el que el depósito se divide en pequeños bloques de mineral de forma cubica, posterior a eso se determina información clave como tonelaje, leyes y atributos geológicos. Si el modelo de recursos geológico tiene potencial; un equipo multidisciplinario se encargará de transformar los recursos minerales en un negocio productivo. (Cornejo. [17])

De esta manera se comienza a generar un plan de minado que genere valor, el cual debe cumplirse para maximizar los beneficios de la empresa, programando las actividades a realizar en las diferentes etapas, pretendiendo concluir un plan de minado del yacimiento.

El enfoque que puede adoptar la planificación minera desde un punto de vista de decisiones a tomar puede ser estratégicas, tácticas u operativas. A nivel estratégico se revisan escenarios de negocio con distintos niveles de inversión; tomando la decisión de seguir un camino considerando los lineamientos de la administración del negocio minero (definiendo fechas de inversiones, capacidades de producción, vida de la mina, entre otras). A nivel táctico ya se han definido las decisiones que se tomarán en los próximos años; determinando los recursos necesarios para cumplir

los hitos y la cantidad de recursos que se extraerán en los siguientes años. Finalmente, a nivel operativo se deben revisar los objetivos de corto plazo; poniendo en perspectiva los imponderables que han afectado y las acciones de mitigación que deben realizarse.

A partir de esto, se define un plan minero mediante un proceso iterativo; el cual intenta tener la mejor solución agendando los planes de inversión, producción minera y procesamiento. La *Ilustración 2* muestra el proceso de planificación.

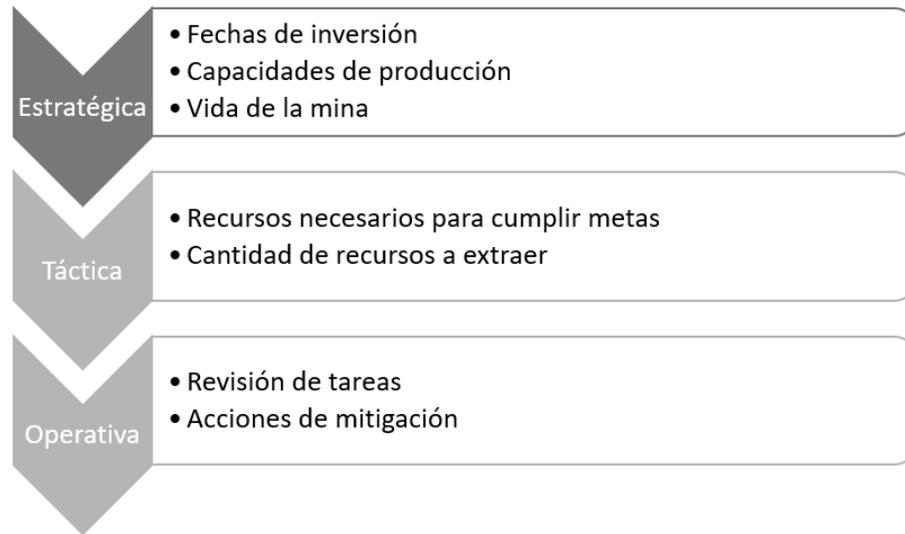


Ilustración 2 Proceso de planificación.

2.3.- Minería Subterránea

Si la relación estéril-mineral que arroja el algoritmo de Lerchs y Grossman para definir el pit final no es rentable (Lerchs y Grossman. [18]), será necesario utilizar métodos de explotación subterráneos.

Los métodos de explotación subterráneos pueden clasificarse en tres grandes grupos:

2.3.1.- Auto soportados

También conocidos como métodos de caserones abiertos o soportado por pilares, comúnmente aplicado para minería selectiva. Ejemplos de este tipo son: Room and Pillar, Stope and Pillar, Shrinkage Stopping, Sublevel Stopping, Longwall Mining, etc.

2.3.2.- Soportados artificialmente

En este caso los caserones necesitan ser rellenos para generar el soporte. Estos métodos son de alto costo y generalmente están asociados a yacimientos en que se necesita ser muy selectivo, por ejemplo, en la minería de vetas de oro (Arancibia. [19]). Dentro de este grupo se encuentran los métodos de Cut and Fill, Bench and Fill, Shrinkage, Vertical Crater Retreat, etc.

2.3.3.- De hundimiento

Estos métodos son utilizados en yacimientos masivos y de grandes dimensiones, no tienen soporte como en los casos anteriores. Se basa en la socavación del material del cuerpo mineralizado mediante la creación de un corte en la base de la zona a minar, el mineral cae relleno la cavidad generada cada vez que esté es en el ciclo productivo. El hundimiento puede ser natural o inducido dependiendo de la calidad de la roca en que se encuentra el cuerpo mineralizado. Algunos métodos de hundimientos son: Block/Panel Caving, Sublevel Caving, etc.

2.4.- Block Caving

El método de explotación subterráneo Block Caving corresponde a aquella operación donde el cuerpo mineralizado se hunde de manera natural luego de que se genere la socavación de un área adecuada ubicada debajo de éste, recuperando el material fragmentado a través de los puntos de extracción. A medida que el material fragmentado es extraído por los puntos de extracción, el material superior colapsará llenando el vacío generado por la extracción. Entonces ocurrirá una propagación vertical del colapso en respuesta a la remoción continua de material fragmentado a través de los puntos de extracción que se encuentren en producción. La forma en que el material fragmentado se desplace, desde su posición inicial, anterior a la minería, hasta su posición final en el punto de extracción, dependerá de diversos factores relativos a la geología, la geomecánica, el diseño minero y la estrategia de extracción que se adopte, y tendrá consecuencias importantes en el negocio minero (Brannon et al. [20]). En la *Ilustración 3* se muestra un esquema de Block Caving en isométrico y sección.

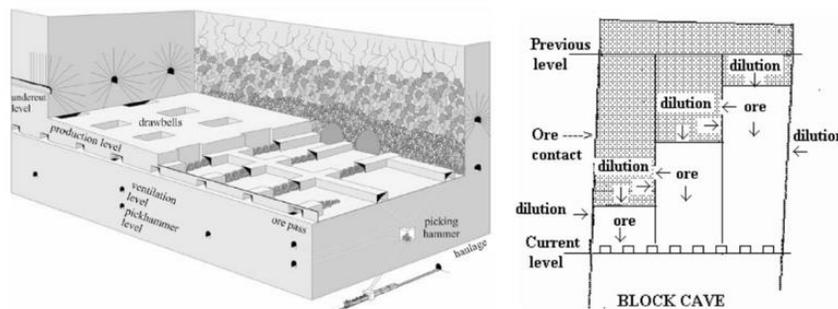


Ilustración 3 Esquema tradicional de un Block Caving en vista isométrica y sección (Brown [11]).

En cuanto a desarrollos e infraestructura necesaria para la extracción de mineral mediante este método, una serie de niveles son necesarios como mínimo. La *Ilustración 4* muestra el esquema en vista de planta:

- Nivel de Hundimiento: En este se realiza la socavación de la columna mineralizada, mediante perforación y tronadura.
- Nivel de Producción: Aquí la roca es cargada desde el punto de extracción y transportada mediante equipos mecanizados hasta un pique de traspaso.
- Nivel de Inyección o Ventilación: Permite el ingreso de aire fresco y la descarga de aire viciado desde los niveles en producción.

- Nivel de Acarreo o de transporte intermedio: Donde se produce el carguío y transporte de mineral proveniente desde el nivel de producción. Este nivel puede no ser necesario en algunas faenas mineras.

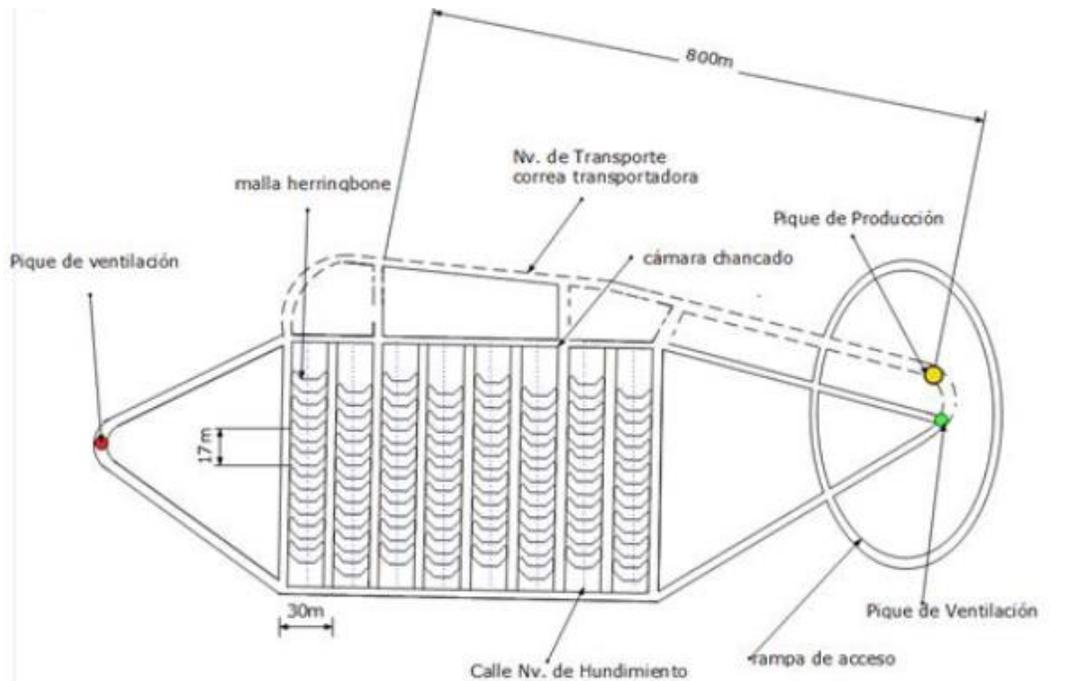


Ilustración 4 Esquema de una mina de Block Caving, vista en planta.

2.4.1.- Block Caving Explotado por Macro Bloques

El Block Caving explotado por Macro Bloques es una extensión del Block Caving tradicional, la cual tiene como objetivo desarrollarse en el proyecto de Chuquicamata Subterráneo (Fuentes et al [13]). El concepto de Macro Bloques ha sido analizado y desarrollado como un desafío más de CODELCO, especialmente, en la administración de operaciones mineras, geomecánicas y puntos relacionados con la geometría del yacimiento (Fuentes et al [3]).

Esta extensión del método permite tener varias áreas de la mina o “Macro Bloques” separados por pilares en distintas etapas, por ejemplo, se puede tener un macro bloque en la etapa de construcción mientras que otro ya extrayendo mineral, permitiendo tener un mejor manejo de las interferencias simultáneas de preparación y producción que se puedan presentar. A su vez este formato de hundimiento por módulos permite continuar con la operación si hay algún detalle operacional dentro del macro bloque en producción, ya que cada uno de éstos puede considerarse como una mina independiente, teniendo incluso sus propios equipos de producción y desarrollo necesarios para cumplir con las metas propuestas, permitiendo tener mayor flexibilidad. La *Ilustración 5* muestra el esquema de lo mencionado anteriormente.

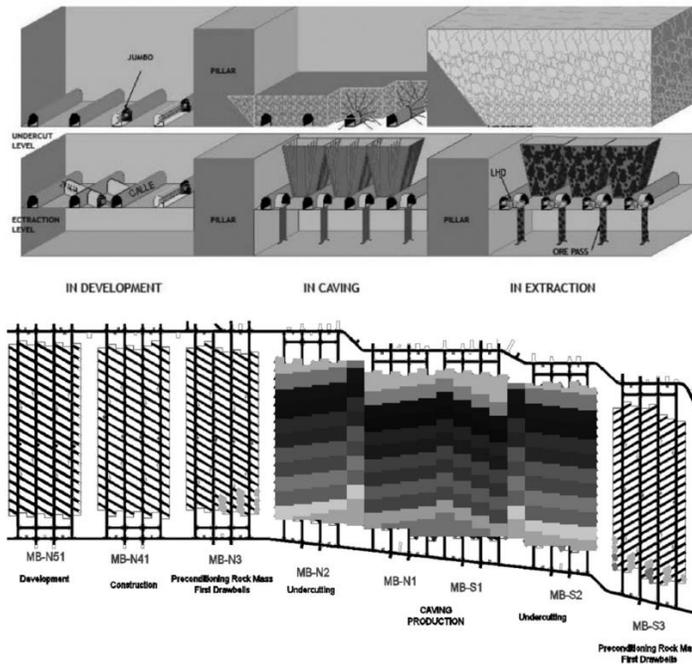


Ilustración 5 Esquema de un Block Caving explotado por Macro Bloques, vista perfil y planta (Fuentes et al [3]).

Durante los últimos años se han presentado diversas publicaciones enfocadas a Block Caving explotado por macro bloques. En el 2008 se define la implementación de una nueva variante de Block Caving la cual permitirá administrar las interferencias operacionales durante el ciclo de minado, este método divide el área de interés en subáreas independientes llamadas macro bloques (Fuentes et al [3]). En el 2013, se presenta un trabajo que identifica la hundibilidad del macizo rocoso y la fragmentación del mineral extraído como variables intrínsecas a las cuales se les cuantificará el riesgo; estas variables fueron analizadas para los macro bloques N1 y S1 del Proyecto Chuquicamata Subterráneo (Sanchez [22]). Por otro lado, en ese mismo año se presenta una tesis para el mismo proyecto que considera apropiado dejar un pilar entre la falla principal del yacimiento y el límite de la explotación de la mina denominado Pilar Oeste, dicho pilar tiene el objetivo de proteger del material diluyente presente en la falla a las reservas existentes; el cual puede ser un riesgo potencial para el proyecto (Ferrada [23]). Posteriormente, en el 2014 se presentan los conceptos y génesis de la variante del método, donde se menciona que el Proyecto Chuquicamata Subterráneo considerará esta configuración para mejorar la administración de las operaciones mineras y control de problemas geomecánicos (Fuentes et al [13]). En ese mismo año se presenta un trabajo donde se sientan las bases de la planificación de un plan de producción para una mina de Block Caving con unidades de explotación de macro bloques; maximizando el VAN considerando ciertas restricciones de riesgo utilizando datos históricos (Jiménez [24]).

En el 2018, se presentaron diversos artículos que analizan diversos problemas que pudiesen surgir durante una mina explotada mediante Block Caving explotado por macro bloques, uno de ellos es la simplificación del manejo de mineral, maximizando la productividad a través de la optimización de las distancias de acarreo resolviendo el problema al introducir piques de traspaso de mineral dentro del piso económico (Paredes [25]). Otro artículo realiza una evaluación geomecánica

utilizando modelación numérica tridimensional ese mismo año; en el que se evalúa la construcción y operación de al menos dos macro bloques trabajando independientes según la dimensión del pilar de costilla y la secuencia de hundimiento que habrá entre ellos (Hormazabal [26]). En ese mismo año se presenta uno de los primeros artículos que analizan y modelan las colgaduras que pueden afectar los ritmos de producción en una operación de Block Caving configurada por macro bloques (Castro et al [27]). También a finales del 2018, se presenta una sinopsis de los principales desafíos que enfrentará el Proyecto Chuquicamata Subterráneo para cumplir los objetivos de dicho proyecto de negocio; los principales desafíos citados fueron operaciones simultaneas, aceleración de ramp up y agendamiento óptimo de los macro bloques y la dilución temprana o tardía (Flores et al [28]).

2.4.2.- Planificación en Block Caving

En la planificación de la minería subterránea se están utilizando recurrentemente simulaciones para determinar planes de minado factibles; teniendo como objetivo principal un plan de producción que entregará el mayor valor para un proyecto minero.

Para realizar una planificación exitosa se debe de considerar la mayor cantidad de información de las distintas áreas, ya sea geomecánica, geológica, costos, precios, entre otros, tratando de realizar un plan que incorpore la mayor cantidad de variables. Debido a la cantidad de información que requiere una planificación exitosa, en general se tratan de hacer simplificaciones que no llegan a un plan de producción que involucre todas las variables. Por lo tanto, la planificación es un proceso iterativo que se debe hacer bajo distintos parámetros, dependiendo del horizonte de tiempo al que se quiera apuntar. (Arriagada [4])

La selección de reservas incorporadas en los planes de producción se realiza mediante un criterio marginalista; el cual consiste en extraer todo el material el cual su ley pague los costos de extracción hasta su comercialización, generando una serie de escenarios y eligiendo el que entregue el mayor Valor Presente Neto.

Al momento de considerar el valor de costo de oportunidad en la planificación se tendrán resultados más favorables en términos de Valor Presente Neto; esto debido a que se considera procesar un mineral de mayor ley en vez de procesar un mineral de menor ley en un determinado tiempo, maximizando el Valor Presente Neto de un agendamiento óptimo de extracción. (De la Huerta [5])

En la *Ilustración 6* se visualiza la estimación de reservas de minas explotadas por Block Caving ya que es parte de todo un proceso de planificación complejo, por lo que es necesario entender los fundamentos de las herramientas actuales para agregar posibles modificaciones que determinen un proceso alternativo; obteniendo las reservas extraíbles con herramientas avanzadas que modelen el proceso de mezcla. (Rubio [6])

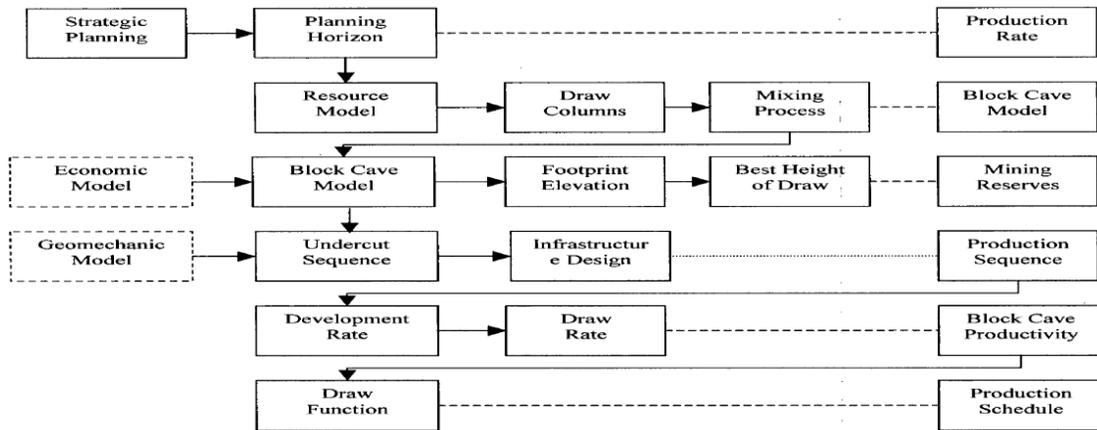


Ilustración 6 Diagrama de planificación para minas de Block Caving (Rubio [6]).

2.4.3.- Piso económico en Block Caving

El piso económico corresponde a la porción de área del yacimiento conformado por el modelo de recursos geológicos en el cual es viable destinar recursos para comenzar a realizar labores de infraestructura. Para determinar la ubicación del piso económico deben considerarse aspectos geotécnicos, operativos, etc. teniendo como ubicación final aquella que maximice el retorno del proyecto. La *Ilustración 7* muestra un ejemplo de piso económico.

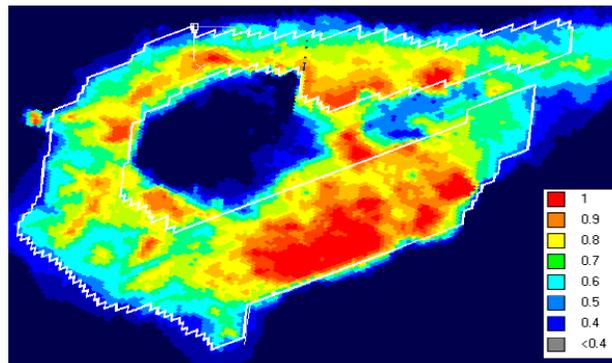


Ilustración 7 Piso económico de División El Teniente, Codelco Chile.

2.4.4.- Envoltente económica en Block Caving

En Block Caving, la envoltente económica está constituida por los recursos disponibles dentro del modelo de recursos geológicos que son económicamente extraíbles. Para esto se debe considerar que en minas explotadas por Block Caving la envoltente tendrá relación a las columnas de mineral extraídas por los puntos de extracción, la que condiciona la forma de ésta. La envoltente económica sigue la forma y la ubicación del piso económico, creciendo hacia la vertical. Véase *Ilustración 8*.

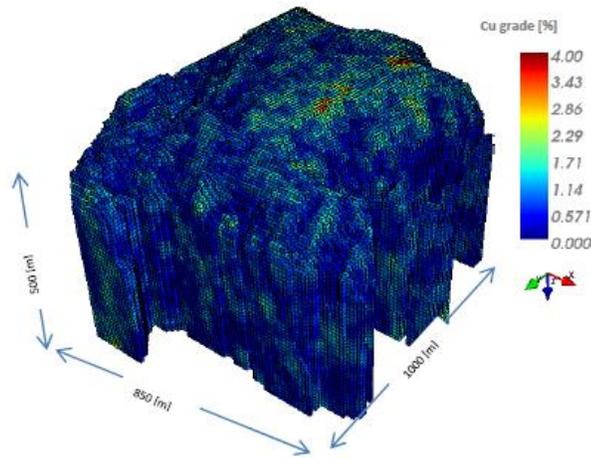


Ilustración 8 Envolvente económica de un modelo de recursos geológicos (Vargas. [2]).

2.4.5.- Velocidad de Extracción

La velocidad de extracción corresponde a la cantidad de mineral que es extraído por los puntos de extracción considerando una unidad de tiempo. Este parámetro controla el quiebre de la columna mineralizada manteniendo un nivel de sismicidad bajo al momento de generarse el hundimiento natural.

La planificación de velocidad de extracción se realiza para controlar principalmente los siguientes objetivos (CODELCO [30]):

- Evitar la extracción de material quebrado más rápido que la capacidad con que se propaga el quiebre ascendente de la columna de roca in situ, evitando colgaduras en altura que pueden romper en gran volumen, ocasionando daños en la infraestructura minera o explosiones de aire por el efecto pistón del material que cae repentinamente (air blast).
- Controlar que el quiebre ascendente de la columna de roca sea relativamente lento para que la energía generada en cada evento de fractura de roca sea disipada en forma aislada. Un proceso de quiebre rápido puede generar mayor cantidad de rupturas, de mayores extensiones y encadenadas, provocando actividad sísmica de alta magnitud.

La velocidad de extracción varía según el porcentaje de columna mineralizada extraída, considerando velocidades de extracción bajas al inicio de la extracción de la columna mineralizada y velocidades más altas al extraer cierto porcentaje de la columna mineralizada.

2.5.- Gurobi y Agendador UDESS

2.5.1.- Paquete computacional Gurobi

Gurobi es un optimizador que se encuentra en el estado del arte de la programación lineal (LP), programación cuadrática (QP) y la programación entera-mixta (MILP y MIQP). Fue diseñado desde cero para aprovechar modernos procesadores multi-core y se encuentra disponible de manera gratuita para fines académicos.

Para la resolución de los modelos LP y QP, Gurobi incluye implementaciones de alto rendimiento del método simplex primal, el método simplex dual, entre otros. Para los modelos MILP, Gurobi incorpora los últimos métodos que incluyen cutting planes y potentes heurísticas de resolución. Además, todos los modelos se benefician de los métodos avanzados de presolve para simplificar los modelos y analizar si existe solución antes de efectuar la resolución.

Para realizar una evaluación de la calidad de los resultados, debe considerarse el concepto de GAP de optimización en la resolución de un problema de optimización en Gurobi; siendo el concepto GAP un porcentaje de error admisible con respecto a la solución óptima, pues es sobre dicho concepto que se explicará la validación de una solución.

En la *Ilustración 9* es posible observar dos curvas que representan la variación del valor objetivo en el tiempo de resolución. Al tratarse de una programación lineal, se transforma por tanto el modelo en un set de ecuaciones lineales que a su vez se resuelven matricialmente a través de iteraciones. En dicho proceso iterativo, la curva verde representa la efectiva evolución del valor objetivo, la cual parte en el origen desde cero y se comporta de manera creciente al buscar la maximización de dicho valor, pero con cada iteración eventualmente se mejora en un menor porcentaje dicha solución. Por otra parte, se tiene la curva roja que parte desde una cota máxima de valor objetivo y decae asintóticamente acercándose a la curva de evolución del valor objetivo (curva verde) pero sin cruzarla. Finalmente, este proceso produce un resultado más preciso y se detiene cuando la diferencia de valores objetivos entre dichas cotas de las curvas está dentro de un cierto valor entregado como parámetro al inicio de la optimización (GAP). Es decir, mientras menor sea el porcentaje de GAP entregado más preciso será el resultado entregado por el optimizador Gurobi. (Rocher [8])

La utilización de un porcentaje de error admisible en optimización (GAP) es un concepto muy utilizado en el campo de resoluciones numéricas, pues de otro modo la búsqueda de un resultado exacto y preciso podría eventualmente tomar un lapso de tiempo no aceptable (e incluso absurdo) sin mejorar sustancialmente la solución encontrada.

Específicamente en el trabajo a desarrollar, se pretende maximizar la función de beneficio considerando un GAP determinado, función que está basada en parámetros técnico económicos que se mencionaran más adelante en el caso de estudio.

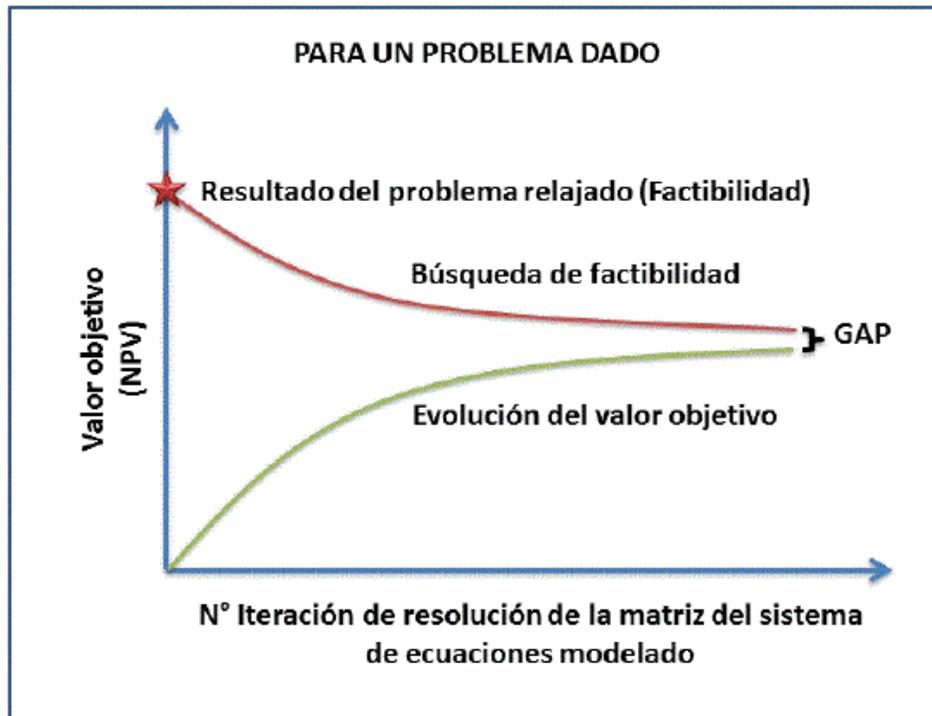


Ilustración 9 Metodología de resolución de Gurobi considerando un GAP (Rocher [8]).

2.5.2.- Programación Lineal

La programación lineal es un campo de la programación matemática enfocada a optimizar una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de reglas o restricciones expresadas mediante un sistema de ecuaciones.

Las variables son números reales mayores o iguales a cero; por otro lado, si queremos que los resultados de las variables sean un número entero, el proceso de resolución se llama programación entera.

Los primeros algoritmos para realizar planificación minera están basados en programación lineal, en donde a grandes rasgos se busca maximizar el flujo de efectivo descontado mediante un interés impuesto. Este tipo de planificación basada en la programación lineal busca agendar sectores del pit final con restricciones planteadas; secuenciando la futura extracción de mineral de diversos sectores del pit. (Johnson [21])

2.5.3.- Programación Entera-Mixta

A esta categoría pertenecen aquellos problemas de optimización que consideran variables de decisión enteras o binarias, pero no de forma exclusiva. De esta forma un problema de PEM puede considerarse como un híbrido entre distintas categorías de modelamiento, siendo un caso típico aquel que considera la mezcla de variables enteras y variables continuas.

2.6.- Secuenciador y Agendador UDESS

El software UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) fue desarrollado en el Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS en 2011, como una nueva línea de investigación que trata de resolver el problema de preparación minera, transforma todos los segmentos del layout en actividades que tienen los atributos necesarios para preparar un modelo de optimización. Incorpora variables de tipo continuas, para referirse al porcentaje de avance de las actividades a realizar por periodo y variables binarias, para controlar el inicio y término de cada una de las actividades.

Para poder trabajar con la herramienta UDESS es necesario definir dos tipos de archivos llamados Actividades y Precedencias.

2.6.1.- Actividades

Los archivos de actividades consisten en un listado de subactividades que constan con atributos definidos los cuales pueden ser beneficio, máximo avance consumo de actividad por periodo, leyes, costos, precios, etc.

2.6.2.- Precedencias

Los archivos de precedencias consisten en entrelazar el archivo de actividades mencionado anteriormente, donde uno como usuario, define cual actividad debe iniciarse primero, y una vez concluida dicha actividad, se podrá iniciar una nueva actividad. En este archivo es de gran importancia conocer la secuencia de las actividades a realizar para realizar una adecuada optimización.

2.6.3.- Función objetivo

La función objetivo cambia según lo que se requiera del negocio. Dentro de las más consideradas es maximizar el valor presente neto, ya que la actividad debe tener el mayor retorno a lo largo de la vida de la mina. En particular, la plataforma ocupada para el desarrollo de esta memoria solo cuenta con una función objetivo de maximizar el Valor Presente Neto.

2.6.4.- Restricciones

El software cuenta con un módulo de restricciones en el cual se pueden limitar diferentes parámetros para apegar más el problema a la realidad. A continuación, se muestra cada una de ellas.

2.6.5.- Restricción de recurso operacional

Implementa una restricción que limita el consumo de un recurso para todas las actividades en cada uno de los periodos definidos. Se debe seleccionar un atributo que represente el consumo, en base mensual e independientemente de la longitud de los periodos definidos anteriormente, de las actividades del recurso en cuestión. Esta restricción se aplica a todas las actividades del proyecto.

2.6.6.- Inicio de restricción de capacidad de recurso

Implementa una restricción que limita el consumo, de un recurso dado, al iniciar las actividades. Se debe seleccionar un atributo que represente el consumo, en base mensual, de las actividades del recurso en cuestión. Esta restricción se aplica a todas las actividades.

2.6.7.- Restricción límite de progreso

Implementa una restricción que obliga un cierto progreso de una actividad en un rango de tiempo dado. "Minimum Progress" y "Maximum Progress" deben ser números entre 0 y 1.

2.6.8.- Restricción de rango de recurso

Implementa una restricción que limita el consumo de las actividades, de un recurso dado. Se debe seleccionar un atributo que represente el consumo, en base mensual, de las actividades del recurso en cuestión. A diferencia de la restricción de recurso operacional, esta restricción limita el consumo total en el rango de tiempo dado y no a cada periodo individual.

2.6.9.- Restricción de incompatibilidad de actividad

Corresponde a una restricción que limita el desarrollo simultáneo de un grupo de actividades en un intervalo de tiempo dado. "Amount" se refiere al número máximo de actividades que se pueden realizar simultáneamente.

2.6.10.- Restricción de inicio de periodo

Implementa una restricción que limita el intervalo de tiempo en el que un grupo de actividades debe comenzar.

3.- Costos en Block y Panel Caving

La gestión de costos para un proyecto consta primordialmente de estimar los procesos, presupuestar los procesos y controlar los costos en base a los recursos necesarios para llevar a cabo sus actividades. Cada una de las actividades presupuestadas se ejecuta una o varias veces dentro de un proyecto consumiendo cierta cantidad de los recursos destinados. (Vergara [31])

Una buena gestión de costos requiere de una visión global de los procesos de producción; entendiendo la manera de cómo se comportan a lo largo de las actividades del proceso, identificando los factores que causan su variabilidad y conocer el comportamiento en función de los parámetros operacionales.

En los inicios de un proyecto minero se pueden presentar un mayor abanico de posibilidades para cada una de las decisiones, las cuales en el caso de cada proyecto tienen que ver principalmente con inversiones en infraestructura, maquinaria y equipos para llevar a cabo el método de exploración seleccionado. A medida que se avanza en el proceso, las nuevas decisiones presentan una gran variabilidad ya que se relacionan con las actividades operacionales que se llevarán a cabo en el corto plazo. Por esta razón, una correcta gestión de las actividades permitirá a la operación mantenerse en niveles competitivos. (Vergara [29])

En la gestión de costos dentro del ámbito minero, se diferencian dos tipos de costos; el costo capital y el costo operacional (Rudenno [10]). Para determinar el costo capital es necesario contar con experiencia en la participación de proyectos previos y tener las bases de cómo se estimaron. Y para determinar el costo operacional es necesario contar con experiencia en campo de proyectos similares; ya que este tipo de costos presentan diversos problemas que son cambiantes en cada uno de los proyectos.

Este trabajo se enfocará en el costo operacional, analizando su comportamiento en las actividades que se llevarán a cabo para el minado de un Block Caving.

3.1.- Estructura de Costos

La estructura de costos para este trabajo estará asociada con los gastos que se generan al llevar a cabo un proyecto de Block Caving, dividiéndose dichos costos en dos tipos: costos fijos y costos variables.

3.1.1.- Costos Fijos

Los costos fijos en una operación de Block Caving son los gastos que se generan al desarrollar actividades para mantener la mina en condiciones para poder producir. Los costos fijos estarán compuestos por las contribuciones de personal de supervisión involucrado en el proyecto, costo de operación de equipos que entregan producción, costos por bombeo de agua y costos administrativos.

Para este trabajo, el valor del costo fijo estará incurrido en cada tonelada que sea extraída durante el proceso de minado, describiendo las actividades que lo componen a continuación:

3.1.1.1. Personal de Supervisión

El personal de supervisión tiene como tarea primordial revisar las tareas en campo realizadas por personal que opera los equipos teniendo como meta seguir los estándares de seguridad de la empresa y ejecutar de manera eficiente cada una de las tareas realizadas por los operadores a cargo, esta actividad será una de las componentes del costo fijo.

3.1.1.2. Equipos de Operación

Otra de las actividades que compondrá el costo fijo es la utilización y mantenimiento de los equipos de operación, ya que su utilización y mantenimiento depende de si se tiene producción o no. Una de las maquinas que mayor utilización tienen dentro de las operaciones mineras de Block Caving es el equipo LHD; el cual requiere diésel y aceites lubricantes para su operación, cambio de neumáticos por desgaste primordialmente, mantenimiento periódico de la cuchilla de su balde, refacciones o piezas requeridas para el mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. Otro equipo con alta utilización son los martillos que reducen el tamaño de material, necesitando cambio de pica periódicamente y mantenimiento preventivo y correctivo. También los equipos de acarreo y transporte requieren de mantenimientos para su correcto funcionamiento.

3.1.1.3. Bombeo de Agua

En una operación de Block Caving existen diversos factores que pueden crear la acumulación de agua, siendo algunos de estos, filtraciones de agua debido al nivel freático, el agua de perforación, sistemas de riego sobre las galerías para la eliminación de polvos y filtraciones por fallas o fracturas que están conectadas a bolsas de agua cercanas al yacimiento. Para abatir la acumulación de agua se debe instalar un sistema de bombeo y de esta manera evitar problemas o retrasos. Esta actividad presenta un consumo constante de energía, el cual será otra de las actividades que compondrán el costo fijo.

3.1.1.4. Administrativos

Los costos administrativos serán la última actividad que constituirá los costos fijos, incluyendo rentas de oficinas, seguros, transporte de personal, cuotas ambientales, viajes de trabajo, alimentación, licencias de softwares, servicios de internet, combustible para vehículos utilitarios, bonos salariales, herramientas menores, suministros y servicios de limpieza, donaciones voluntarias, entre otros.

3.1.2.- Costos Variables

Los costos variables en una operación de Block Caving se consideran como los costos primarios, estando compuestos por los costos que genera el sistema de ventilación y la cantidad de actividades auxiliares que se requieran ejecutar para mantener las áreas de trabajo en buen estado para cumplir con las metas de producción.

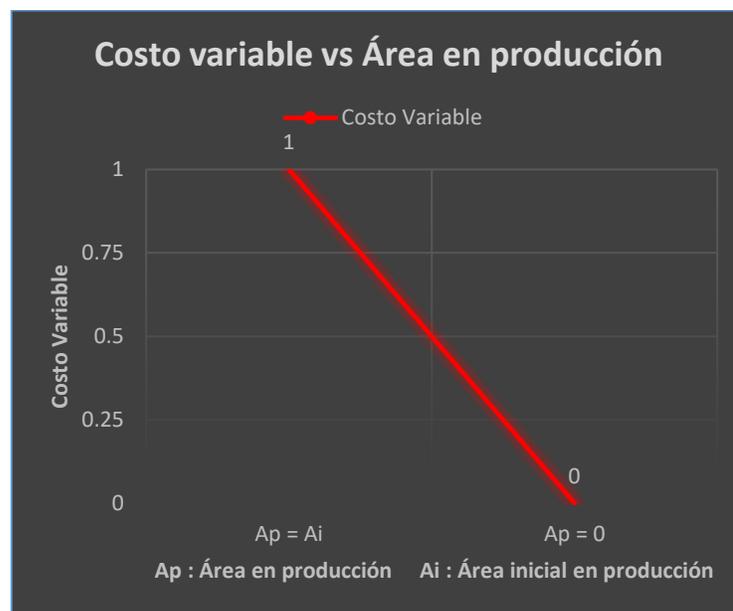
Este parámetro de costo variará según en la etapa del proyecto que nos encontremos, en los inicios de la producción de un Block Caving los costos variables se mantendrán constantes si el área que entrega producción es la misma que el área inicial preparada para generar el Caving. Por el

contrario, los costos variables disminuirán si el área que entrega producción es menor que el área inicial, esto debido a que puntos de extracción han terminado su etapa de producción.

Las actividades que hacen que disminuya el costo variable son las siguientes:

- Menor costo generado por el sistema ventilación, debido a que el área a ventilar se irá reduciendo conforme se vayan cerrando puntos de extracción.
- Menor costo de mantenimiento de carpetas de rodamiento por donde circulan los equipos de rezagado.
- Menor mantenimiento de infraestructura de obra civil como muros, parrillas metálicas y limpieza da calles.
- Menor mantenimiento a infraestructura de puntos de extracción debido a que el material extraído es más fino, proveniente de una elevación más alta.

La *Gráfica 1* muestra el comportamiento del costo variable en función del área que entrega producción, donde si el valor del Área en producción A_p es igual al valor del Área inicial A_i el costo variable tendrá un valor de 1; y si el valor del Área en producción A_p es igual a cero el costo variable tendrá un valor de 0.



Gráfica 1 Comportamiento del costo variable en función del área que entrega producción.

A continuación, se describen las actividades que componen el valor del costo variable:

3.1.2.1. Ventilación

La ventilación es una de las actividades esenciales dentro de las minas subterráneas. La inyección de aire fresco, mantener una temperatura adecuada dentro de los lugares de trabajo, dilución de gases contaminantes, disminución de partículas sólidas suspendidas en el aire y extracción de aire viciado generado por los equipos de combustión son algunos de los objetivos de esta actividad. Para ventilar las zonas de trabajo se requiere de un cierto número de ventiladores que suministren

la cantidad necesaria de pies cúbicos por minuto de aire fresco para ventilar las áreas de trabajo consumiendo cierta cantidad de energía, al momento de que las áreas de trabajo van disminuyendo debido a que puntos de extracción han cumplido su vida útil; la cantidad de pies cúbicos por minuto de aire fresco a suministrar será menor y por lo tanto se requerirán menos ventiladores trabajando para ventilar la zona en producción.

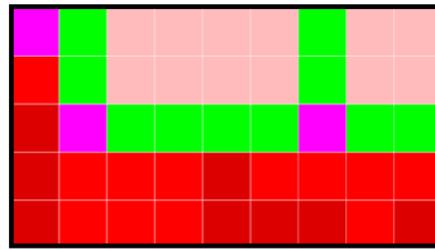
3.1.2.2. Actividades Auxiliares

Dentro de las actividades auxiliares consideramos el mantenimiento de los puntos de extracción con marcos prefabricados que aseguran la estabilidad del área de trabajo, mantenimiento de las carpetas de rodamiento por donde circulan los equipos de rezagado, mantenimiento de infraestructura de obra civil como muros, limpieza de túneles por donde transitan los equipos, mantenimiento de parrillas metálicas ubicadas donde se encuentran los martillos que disminuyen el tamaño del material, utilización de martillo móvil para disminuir el tamaño de material en puntos de extracción, perforación y tronadura secundaria “cachorro” las cuales se realizan cuando ocurren colgaduras en los puntos de extracción, instalación de fortificación con cable en zonas inestables, limpieza de material proveniente de los puntos de extracción, fortificación emergente, entre otras. Todas estas actividades son necesarias cuando los puntos de extracción entregan producción; a medida que los puntos de extracción terminan su vida útil las actividades auxiliares mencionadas anteriormente dejan de ejecutarse, disminuyendo el consumo de recursos.

3.1.3.- Enfoque de Estructura de Costos

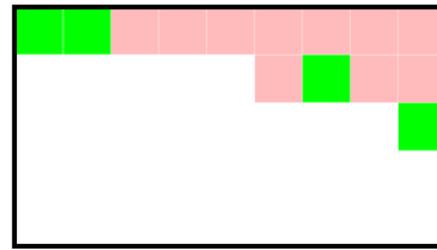
En este trabajo abordaremos la estructura de costos mediante dos metodologías, la primera metodología adopta el costo de operación como una variable fija para valorizar los bloques del modelo de recursos, mientras que la segunda metodología valoriza los bloques del modelo desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables; teniendo una disminución en el costo variable al disminuir el nivel productivo del Block Caving.

Ahora procederemos a determinar cómo se llevará a cabo la estructura de costos en la primera metodología. Esta metodología utiliza el costo de operación de manera tradicional dentro de la expresión de beneficio para la valorización de reservas de un proyecto minero; donde estos son considerados como una variable constante dentro de la evaluación independientemente del área que este entregando producción dentro de un Block Caving, la *Ilustración 10* muestra cómo puede disminuir el área que entrega producción (bloques de colores) al extraer cierto porcentaje de reservas; mientras que el costo de operación se mantendrá fijo.



Vista de Planta

Área en producción de un Block Caving al iniciar el hundimiento



Vista de Planta

Área en producción de un Block Caving al extraer el 70% de sus reservas

Ilustración 10 Vista en planta de un Block Caving donde se observa una disminución de área que entrega producción.

Para valorizar los bloques del modelo de recursos geológicos en la primera metodología utilizaremos la *Ecuación 1*, la cual considera el costo de operación como una variable constante.

$$B = G \cdot R \cdot T(P - Cv) \cdot Fc - (CO + CP) \cdot T$$

Ecuación 1 Expresión de Beneficio utilizada en la primera metodología.

Donde:

B: Beneficio (US \$)

G: Ley (%)

R: Recuperación (%)

T: Tonelaje del bloque (Ton)

P: Precio del cobre (US\$/lb)

Cv: Costo de venta (US\$/lb)

Fc: Factor de conversión de mineral

CO: Costo de operación (US\$/ton)

CP: Costo de procesamiento (US\$/ton)

Para realizar la valorización de los bloques del modelo de recursos; será necesario establecer parámetros técnico económicos que se utilizarán en la evaluación. La *Tabla 1*, muestra los parámetros utilizados.

Parámetros técnico económicos		
Parámetro	Unidad	Valor
Precio del cobre	(\$/lb)	2.55
Costo de operación	(\$/ton)	8
Costo de procesamiento	(\$/ton)	10
Costo venta	(\$/lb)	0.3
Recuperación	(%)	90

Tabla 1 Parámetros técnico económicos.

Una vez establecidos los parámetros técnico económicos se procede a valorizar cada uno de los bloques contenidos en el modelo de recursos con la *Ecuación 1*, después se agruparán los bloques en Unidades Básicas de Extracción (UBE) si un conjunto de ellos se encuentra ubicados espacialmente a una misma elevación. La *Ilustración 11* muestra como un conjunto de bloques a una misma elevación compondrá una UBE y la *Tabla 2* muestra un ejemplo de la valorización de las reservas agrupadas en UBE de un Block Caving.

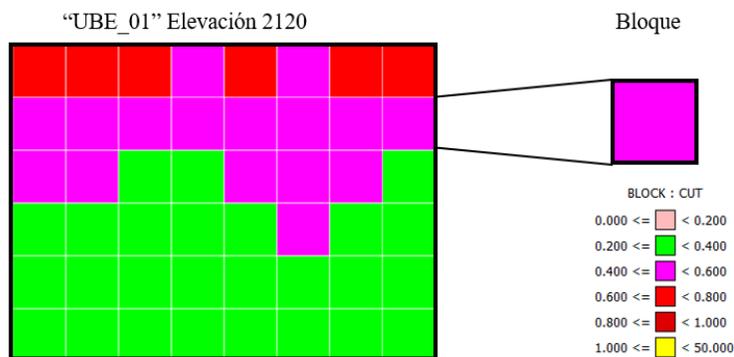


Ilustración 11 Unidad Básica de Extracción (UBE) compuesta por bloques.

UBE	Elevación (m)	Beneficio (USD)
1	2,120	21,201,780
2	2,140	21,886,485
3	2,160	22,773,215
4	2,180	23,440,786
5	2,200	24,606,799

6	2,220	27,125,755
7	2,240	28,465,089
8	2,260	29,130,875
9	2,280	28,097,297
10	2,300	17,827,385
11	2,320	17,085,588
12	2,340	14,651,920
13	2,360	7,519,632
14	2,380	3,261,930
15	2,400	1,368,905
16	2,420	338,363

Tabla 2 Valorización de reservas de un Block Caving agrupadas en UBE utilizando la primera metodología.

Hablando de la estructura de costos en segunda metodología, primero debemos enfocarnos entre el régimen y ramp down de la producción de un plan minero mostrado en la *Ilustración 12*, evaluando el efecto tienen los costos de operación al disminuir el nivel de producción en un Block Caving.

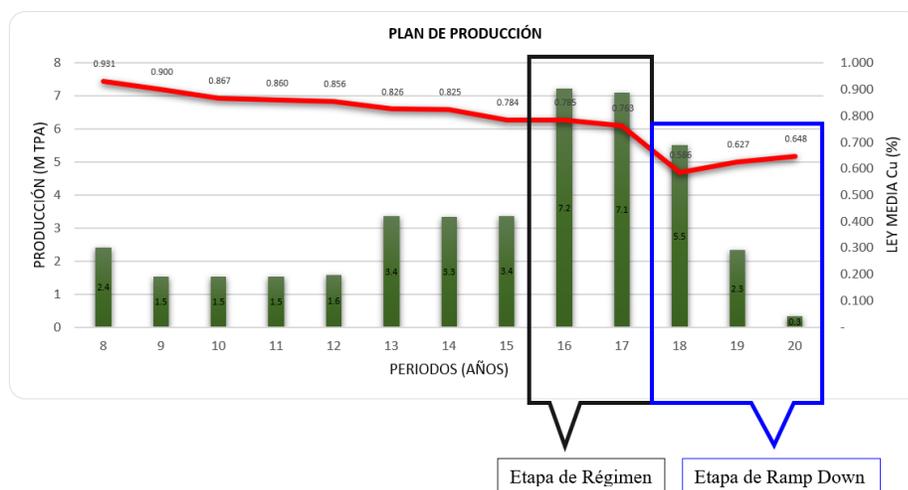


Ilustración 12 Etapas de régimen y ramp down de un plan minero.

Para esto debemos de tomar en cuenta lo que se mencionó en el **capítulo 3.1.1** y **capítulo 3.1.2**, donde el costo de operación estará dividido en costos fijos y costos variables. Refiriéndonos a los costos fijos; estos permanecerán constantes y estarán costeados a cada tonelada que sea extraída durante el proceso, por otro lado, los costos variables permanecerán constantes si no cambia el área que entrega producción en el Block Caving y disminuirán si el área que entrega producción disminuye. La *Ilustración 13* muestra un ejemplo de la disminución de área según el porcentaje de reservas extraídas.

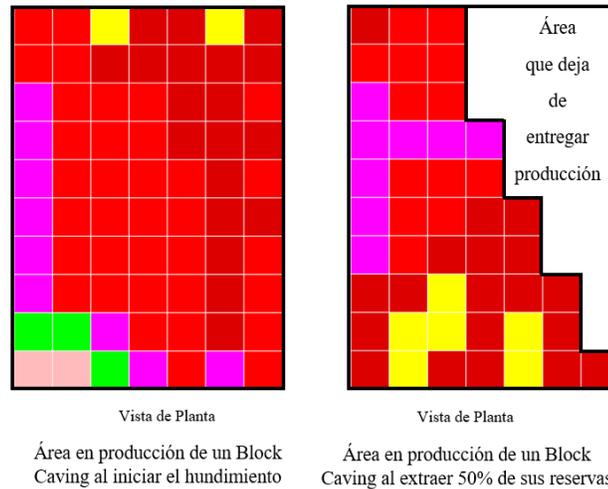


Ilustración 13 Vista en planta de un Block Caving donde se observa la disminución del área que entrega producción.

La valorización de los bloques del modelo de recursos geológicas en la segunda metodología se realizará utilizando la *Ecuación 2*; la cual desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables.

$$B = G \cdot R \cdot T(P - Cv) \cdot Fc - CV \cdot \left(\frac{Ap}{Ai}\right) \cdot T - (CF + CP) \cdot T$$

Ecuación 2 Expresión de Beneficio utilizada en la segunda metodología.

Donde:

B: Beneficio (US \$)

G: Ley (%)

R: Recuperación (%)

T: Tonelaje del bloque (Ton)

P: Precio del cobre (US\$/lb)

Cv: Costo de venta (US\$/lb)

Fc: Factor de conversión de mineral

CV: Costo Variable (US\$/ton)

Ap: Área en producción del macro bloque (m²)

Ai: Área inicial en producción del macro bloque (m²)

CF: Costo Fijo (US\$/ton)

CP: Costo de Procesamiento (US\$/ton)

La valorización de los bloques del modelo de recursos en la segunda metodología utilizará los mismos parámetros técnico económicos que en la metodología anterior con la excepción de que el costo de operación será sustituido por un costo fijo y un costo variable mostrado en la *Tabla 3*.

Costo de operación		
Parámetro	Unidad	Valor
Costo fijo	(\$/ton)	5.50
Costo variable	(\$/ton)	2.50

Tabla 3 Costo de operación desglosado en costos fijos y costos variables.

Ya establecidos los valores de costo fijo y costo variable, se valorizarán los bloques contenidos en el modelo de recursos geológicos con la *Ecuación 2* y serán agrupados en Unidades Básicas de Extracción (UBE). La *Tabla 4*, muestra la valorización de las reservas evaluadas anteriormente utilizando la segunda metodología.

UBE	Elevación (m)	Área Inicial (m ²)	Área Producción (m ²)	Ingreso (USD/Ton)	Costo Unitario (USD/Ton)	Beneficio (USD)
1	2,120	28,000	28,000	31.67	8.00	21,201,780
2	2,140		28,000	32.11	8.00	21,886,485
3	2,160		28,000	32.68	8.00	22,773,215
4	2,180		28,000	33.11	8.00	23,440,786
5	2,200		28,000	33.86	8.00	24,606,799
6	2,220		28,000	35.49	8.00	27,125,755
7	2,240		28,000	36.35	8.00	28,465,089
8	2,260		28,000	36.78	8.00	29,130,875
9	2,280		28,000	36.11	8.00	28,097,297
10	2,300		18,400	35.49	7.14	18,701,122
11	2,320		15,200	38.29	6.86	18,047,965
12	2,340		13,200	38.04	6.68	15,618,255
13	2,360		10,400	31.89	6.43	8,364,132
14	2,380		7,600	27.91	6.18	3,923,035
15	2,400		5,200	24.31	5.96	1,902,629
16	2,420		3,600	20.45	5.82	761,354

17	2,440		2,000	17.76	5.68	231,132
18	2,460		800	20.51	5.57	208,678
19	2,480		400	31.32	5.54	333,339

Tabla 4 Valorización de reservas de un Block Caving agrupadas en UBE utilizando la segunda metodología.

3.1.4.- Discretización de reservas

Para discretizar el modelo de recursos en mineral o tepetate, será necesario valorizar los bloques que componen las reservas por cada metodología, agrupar los bloques en Unidades Básicas de Extracción (UBE) según la elevación a la que se encuentren y realizar una sumatoria de beneficio de los bloques que la componen.

Posterior a eso, se evaluará cada UBE partiendo de la elevación más profunda (nivel de hundimiento); si el valor de beneficio de la UBE es mayor a cero será considerado como mineral a extraer dentro de la optimización y se permitirá evaluar la UBE superior. Por otro lado, si el valor de beneficio de la UBE es menor a cero; ésta será considerado como tepetate y ya no será necesario evaluar las UBE superiores.

4.- Metodología

Este capítulo describe como se llevará a cabo la planificación del Block Caving explotado por macro bloques en el caso de estudio. La planificación abordó dos metodologías, la primera metodología mantiene el costo de operación fijo y la segunda metodología desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables; donde disminuirán los costos variables si el nivel productivo de los macro bloques disminuye. Una vez concluida la planificación se analizará el efecto que tienen los costos en ambas metodologías.

El trabajo de investigación estará constituido por seis etapas principales, las cuales se describen a continuación:

1. Determinar ubicación del piso económico del modelo de recursos geológicos mediante parámetros de costos fijos.
2. Discretizar el piso económico en macro bloques de una dimensión adecuada para poder generar el hundimiento.
3. Determinar la envolvente económica de cada macro bloque considerando el costo de operación como fijo.
4. Determinar la envolvente económica de cada macro bloque desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables.
5. Establecer restricciones de precedencias horizontales y verticales a la secuencia de minado.
6. Metodología para realizar el agendamiento óptimo de extracción con la herramienta UDESS.

4.1.- Piso Económico

En la minería del Caving, la ubicación del piso económico determinará el límite inferior del modelo de recursos geológicos; esto se realiza fijándolo a una elevación. Para determinar la elevación, se deben de valorizar las columnas mineralizadas contenidas sobre la cota inicial seleccionada; siendo la ubicación final del piso económico la cota que entregue el máximo valor de beneficio (Villa [14]). Una vez determinada la ubicación del piso económico tendremos el punto de partida para iniciar la planificación del proyecto.

Para determinarlo es necesario establecer parámetros técnico económicos que nos ayuden a valorizar las reservas. El precio del mineral de interés, costo de operación, costo de procesamiento, costo de venta y recuperación metalúrgica serán los parámetros técnico económicos utilizados.

4.2.- Discretización del Piso Económico en Macro Bloques

La división del piso económico en macro bloques es establecida por la calidad del macizo rocoso y la forma geométrica que adopte cada macro bloque.

El grafico de Caving de Laubscher ha sido el método más utilizado internacionalmente para determinar la hundibilidad en minas de Block y Panel Caving (Laubscher [7]). Al ser desarrollado en base a calidades de macizo rocoso de tipo masivo de diversos proyectos. Para ello es necesario determinar el MRMR; parámetro que determina calidad del macizo rocoso y el radio hidráulico del

área donde se generará el corte basal (Laubscher [12]). La relación entre ambos parámetros debe de ubicarse en la zona inestable del gráfico para poder generar el hundimiento en los macro bloques. En la *Ilustración 14* se presenta el Ábaco de Laubscher.

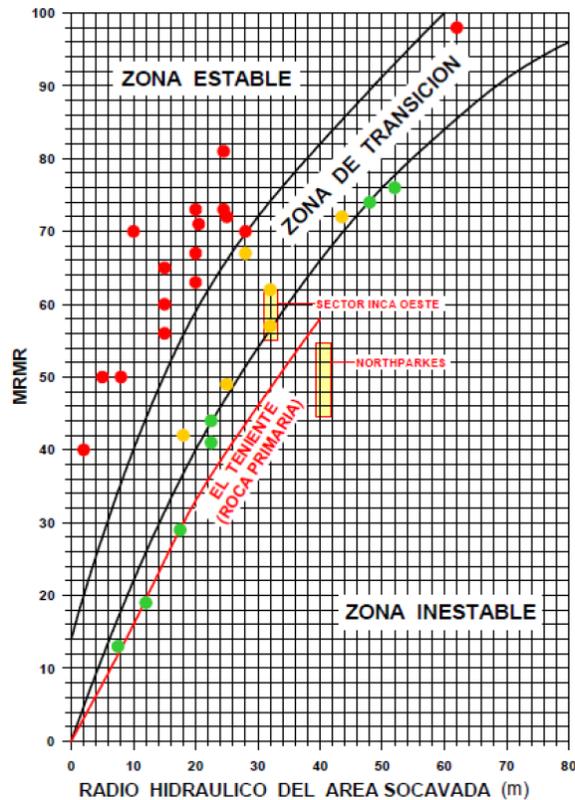


Ilustración 14 Ábaco de Laubscher que define radio hidráulico a partir de valores de MRMR.

4.3.- Determinar la envolvente económica considerando el Costo de operación como una variable fija

En el **capítulo 3** se describe de manera general como serán abordados los costos en ambas metodologías.

Ahora procederemos a determinar cómo se abordará el costo de operación dentro de la primera metodología. Esta metodología adopta la manera tradicional de valorización de reservas de un proyecto minero, en donde no se realiza un desglose en los costos, sino, que estos son considerados como una variable constante dentro de la evaluación.

La variable costo de operación; será considerada como una constante dentro de expresión de beneficio, siendo esta una manera simplificada de abordar el problema, excluyendo los cambios que los costos de operación puedan sufrir al disminuir el nivel productivo de los macro bloques.

4.4.- Determinar la envolvente económica desglosando el Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables

En este apartado definiremos como el costo de operación es abordado en la segunda metodología, donde será desglosado en Costos Fijos y Costos Variables.

Tal como se mencionó en el **capítulo 3.1.1**, los Costos Fijos son todos aquellos que se generan al desarrollar actividades para mantener la mina en condiciones para poder producir. En este trabajo consideraremos dentro de los Costos Fijos el personal de supervisión, el equipo de operación utilizado para la extracción de mineral, el bombeo de agua de las operaciones mineras subterráneas y gastos administrativos.

Por otra parte, los Costos Variables se generan debido a que la operación minera se encuentra en curso, este tipo de costos ascienden o descienden según el nivel productivo que se tenga en la operación tal como se describe en el **capítulo 3.1.2**.

En esta metodología, los Costos Variables disminuirán según el nivel productivo del macro bloque; tomando como base un valor inicial de Costo Variable el cual decrecerá si el área activa del macro bloque que se encuentra en producción disminuye. Este enfoque es debido a que, si disminuye el nivel productivo de un macro bloque, disminuirá la cantidad de recursos consumidos por la ejecución de actividades auxiliares y ventilación.

4.5.- Restricciones de precedencias

4.5.1.- Restricción de precedencias horizontales

Para determinar la secuencia de extracción horizontal de los macro bloques se realizó una valorización económica de cada uno de ellos, adoptando la lógica del costo de oportunidad (De la Huerta [5]), iniciando la secuencia de minado con los macro bloques que entreguen un mayor valor; dejando para después los macro bloques que entreguen un menor valor. Otra restricción considera continuar la secuencia de minado de macro bloques aledaños que entreguen mayor valor, evitando dejar de minar macro bloques intermedios. La *Ilustración 15* presenta la discretización del piso económico en macro bloques, donde se aprecia la secuencia de minado; iniciando con los macro bloques de mayor valor (color rojo) y posteriormente los de menor valor (color naranja) evitando dejar macro bloques intermedios sin minar.

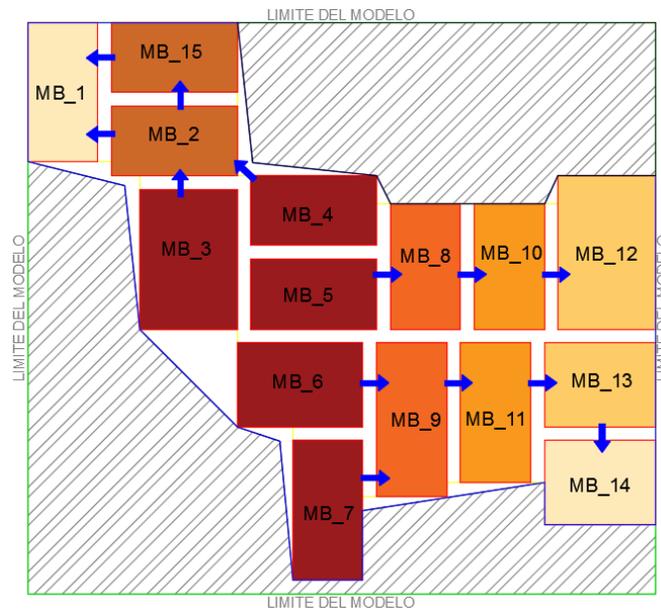


Ilustración 15 Secuencia de minado horizontal de macro bloques contenidos en el piso económico.

4.5.2.- Restricción de precedencias verticales

Una vez determinadas las restricciones de precedencias horizontales entre macro bloques, se procederá a establecer las restricciones de precedencias verticales en cada macro bloque.

Simulando la secuencia de minado de un macro bloque, será necesario realizar un corte basal en la cota inferior (nivel de hundimiento) y posteriormente realizar una extracción uniforme del material por los puntos de extracción. Para replicar esta secuencia y disminuir el número de variables se consideró lo siguiente:

- Todos los bloques que se encuentren dentro del área de un macro bloque y a una misma elevación compondrán una Unidad Básica de Extracción (UBE).
- Extraer por completo la UBE inferior antes de comenzar a extraer la UBE superior.

La *Ilustración 16* muestra la vista en sección de un macro bloque dividido en UBE's, en la cual se muestran las restricciones de precedencias verticales.

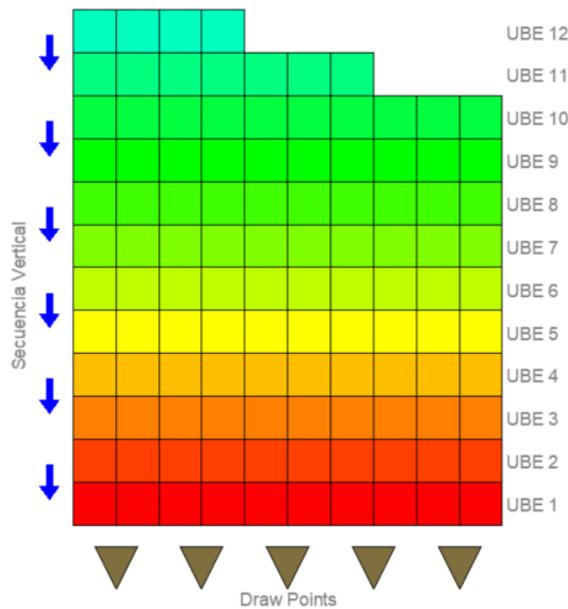


Ilustración 16 Vista en sección de un macro bloque dividido en UBE's mostrando las restricciones de precedencias verticales.

4.6.- Metodología para realizar el agendamiento de extracción con la herramienta UDESS

Como se comentó en el **capítulo 2.6**, es necesario construir un archivo de actividades con los atributos de interés a evaluar, para este caso en particular se trabajará con un listado de atributos con los que se realizará el agendamiento óptimo de extracción, el cual contendrá identificador de la actividad, beneficio, ritmo máximo de consumo de actividad, tonelaje y ley media de cobre. Ahora refiriéndonos al archivo de precedencias, este consiste en un listado de todas las actividades que se utilizarán en el agendamiento y el enlace que habrá entre una actividad y otra; este listado consta de una columna de Predecesor, Sucesor y Grupo. Cada archivo debe tener un formato “txt” para poder ser importado al software UDESS.

Al importar el archivo de “actividades”, es necesario ligar el identificador de actividad, el beneficio de la actividad y el ritmo máximo de consumo de la actividad en la herramienta UDESS.

Posterior a eso, se procede a asignar una tasa de descuento a cada uno de los periodos; en los cuales se consumirán las actividades que estarán asignadas dentro del agendamiento óptimo de extracción. Para este trabajo el valor de la tasa de descuento no tendrá relevancia en los resultados. En este apartado el usuario puede seleccionar el tamaño de periodo a utilizar, ya sea semanas, meses, trimestres o años. Para el trabajo desarrollado se trabajó con tamaños de periodo anuales.

Después de realizar todas esas asignaciones en la pestaña de proyecto, pasamos a la pestaña de precedencias para importar el archivo de “precedencias”.

Al concluir todo el proceso importación de archivos, entramos al apartado más importante de la herramienta donde se asignan todo tipo de restricciones necesarias para una buena optimización. Para el caso de estudio se consideraron restricciones operacionales referentes a un límite máximo

de producción por periodo, restricciones límite de progreso donde se restringe a cierta actividad a ser iniciada y terminada en un periodo determinado de tiempo y forzando actividades a que inicien su proceso producción en un periodo determinado.

Una vez concluido el proceso de asignación de restricciones a nuestro modelo, se procede a seleccionar un GAP con el cual trabajará el software, al hablar de GAP nos referimos a un margen de error con respecto a la solución óptima. Al trabajar con un GAP muy pequeño se pretende tener un margen de error menor y viceversa. Cabe señalar que si trabajamos con un GAP muy pequeño la herramienta realizará un mayor número de iteraciones antes de encontrar la solución; lo cual representa tiempo para el usuario al momento de realizar las optimizaciones.

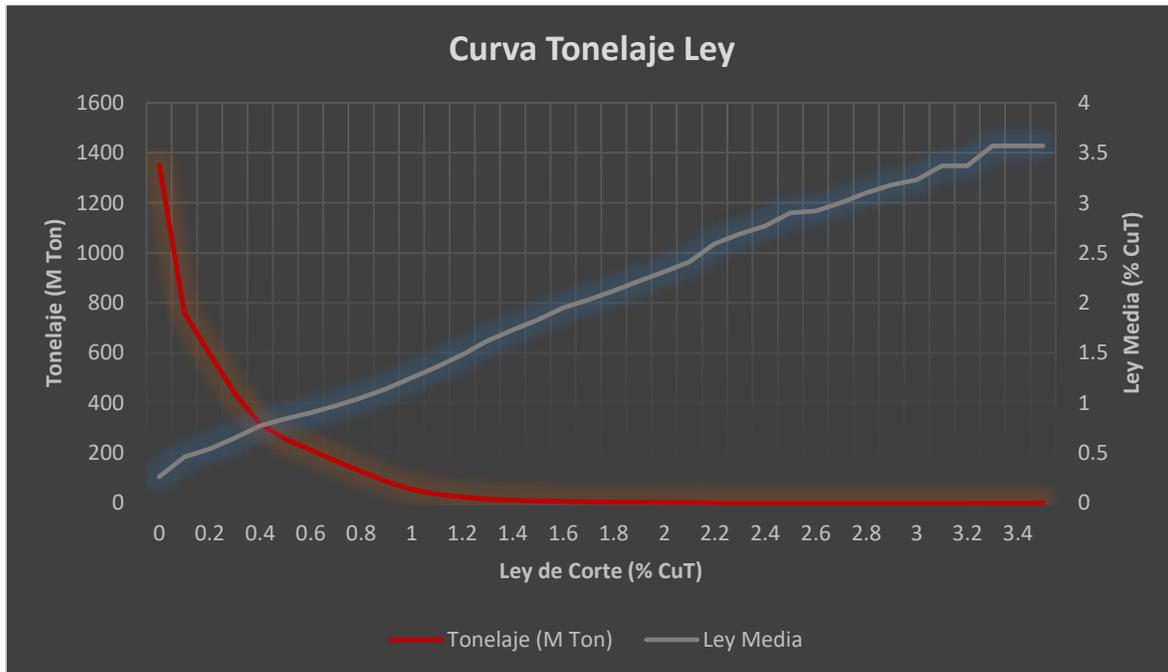
5.- Caso de estudio

El caso de estudio se enfoca en un yacimiento de cobre, el cual tiene las características para ser minado por el método de Block Caving explotado por macro bloques.

El modelo de recursos geológicos que se utilizará en el desarrollo de este trabajo se basa en un modelo de forma cubica, mostrando las características del modelo en la *Tabla 5* y en la *Gráfica 2*.

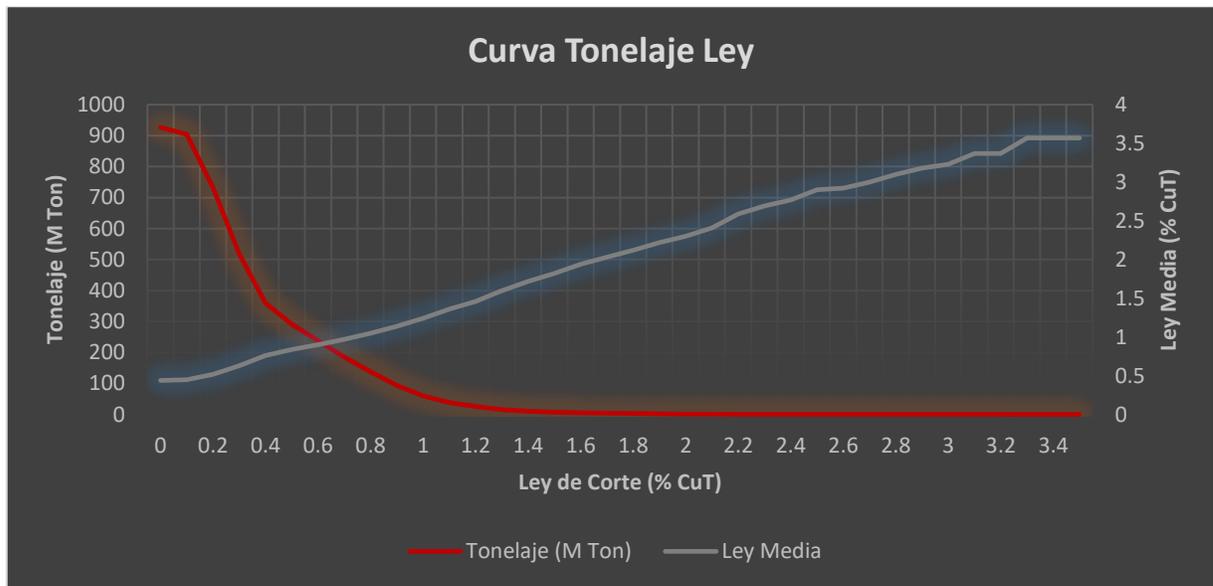
Modelo de recursos geológicos		
Tamaño de Bloque	Metros	20 x 20 x 20
Número de bloques	Bloques	64,708
Densidad	Ton/m ³	2.60
Ley Media Cu	%	0.25

Tabla 5 Características del modelo de recursos geológicos.



Gráfica 2 Curva Tonelaje Ley del modelo de recursos geológicos.

El estado actual del yacimiento tiene la singularidad de un pórfido cuprífero que fue minado a cielo abierto, optando por realizar una transición a un método de minado por hundimiento para poder seguir extrayendo las reservas geológicas. La *Gráfica 3* muestra la curva tonelaje ley de las reservas que tienen potencial para ser extraídas mediante un Block Caving explotado por macro bloques en este trabajo.



Gráfica 3 Curva Tonelaje Ley de reservas con potencial para ser minadas mediante Block Caving.

Como información adicional, en el apartado de Anexo A se encuentra adjunta la Curva Tonelaje Ley del pit final que fue extraído del modelo de recursos geológicos.

5.1.- Descripción geológica y geotécnica

El cuerpo mineralizado está compuesto por roca primaria. El área de mineralización consta de una estructura regular típica de un pórfido cuprífero. La característica principal de la zona mineralizada consta de sulfuros teniendo como elemento de interés principal el cobre. La *Ilustración 17* muestra el modelo de recursos con escala de colores según su ley media cobre.

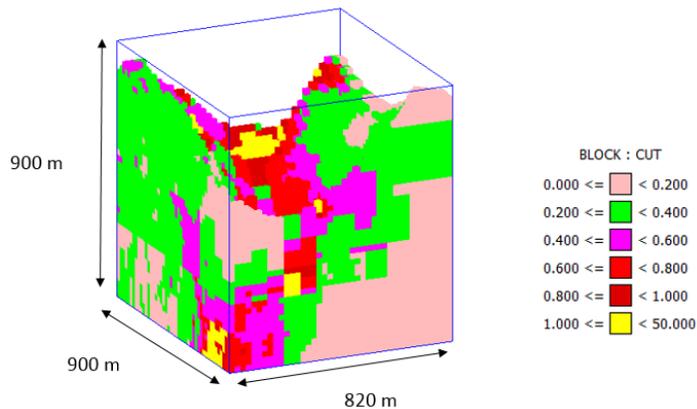


Ilustración 17 Modelo de recursos geológico con escala de colores según su ley media de cobre.

Hablando de las características específicas del modelo de recursos geológicos, éste cuenta con una densidad que varía desde 1.83 ton/m³ hasta 2.77 ton/m³ y una ley media de cobre que varía desde 0.00 % hasta 3.57 %.

5.2.- Piso Económico

En la minería del Caving, la determinación del piso económico consiste en fijar el nivel de hundimiento a una cierta elevación. Para determinar la elevación óptima del nivel de hundimiento es necesario valorizar las columnas mineralizadas contenidas sobre una cota inicial seleccionada; siendo la elevación determinante la que entregue el máximo valor.

Para la determinación del piso económico utilizaremos los parámetros técnico económicos mencionados en la *Tabla 1*.

Con los parámetros establecidos; en la *Gráfica 4* se muestra que los niveles más profundos del modelo de recursos entregan mayor valor, por lo que es viable ubicar el piso económico en la cota 2120.



Gráfica 4 Valorización de piso económico.

5.3.- Límites del piso económico

Para delinear el piso económico será necesario determinar una ley de corte (Jean Michel [9]) con los parámetros técnico económicos establecidos en el **capítulo 3.1.3**, esta ley de corte indica que toda porción del piso económico tenga una ley media de cobre superior a 0.40% será viable para emplazar a los macro bloques.

Siguiendo esta restricción, se aprovecharía un 53.2% del área total del modelo de recursos geológicos. La *Ilustración 18* muestra que área del piso económico que esta sobre la ley de corte (azul) y que área está por debajo de la ley de corte (rojo).

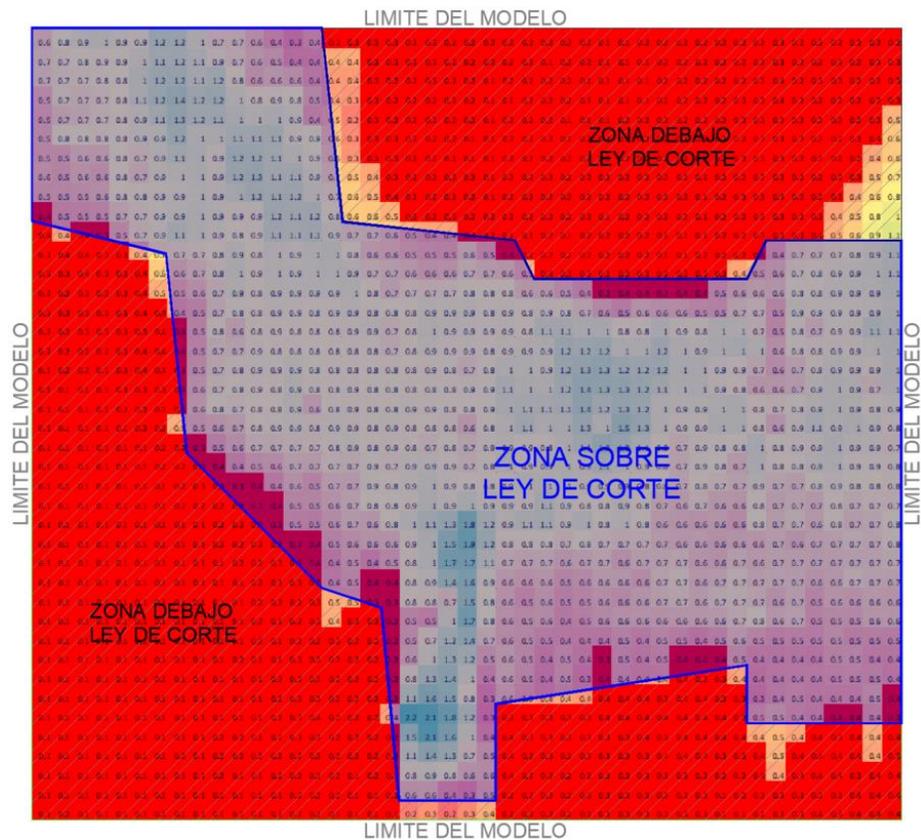


Ilustración 18 Piso económico del modelo de recursos geológicos delimitado por una ley de corte, color “Azul” área sobre la ley de corte y color “Rojo” área debajo de la ley de corte.

5.4.- Discretización del piso económico en Block Caving

La discretización del piso económico está ligada básicamente a la calidad del macizo rocoso y el radio hidráulico mínimo permisible para que se pueda generar el hundimiento (Laubscher [12]).

Considerando un valor de Modified Rock Mass Rating (MRMR) de 50 en todo el modelo y basándonos en el ábaco de Laubscher para determinar la hundibilidad en minas de Block y Panel Caving (Laubscher [7]), estamos restringidos a tener como mínimo un radio hidráulico de 31 para poder generar el hundimiento en los macro bloques según la *Ilustración 19*.

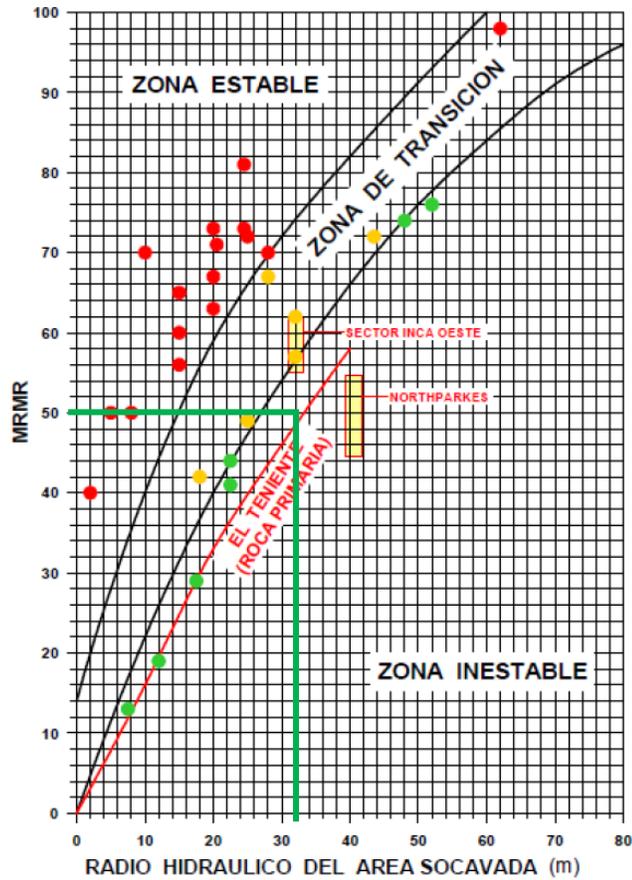


Ilustración 19 Determinación de radio hidráulico adecuado para generar la hundibilidad en un macro bloque (línea verde), utilizando como parámetro de entrada un MRMR 50.

Para poder alcanzar el radio hidráulico antes mencionado consideramos tener macro bloques con dimensiones mínimas de 100 (m) x 180 (m) alcanzando un radio hidráulico de 32.1, el cual es aceptable para generar el hundimiento. En la *Tabla 6* y en la *Ilustración 20* podremos visualizar un resumen de las dimensiones de los macro bloques y su ubicación espacial dentro del piso económico.

Dimensiones de Macro Bloques						
MB	Dimensiones	RH		MB	Dimensiones	RH
1	100 x 200	33.3		9	100 x 220	34.4
2	100 x 180	32.1		10	100 x 180	32.1
3	140 x 200	41.2		11	100 x 200	33.3
4	100 x 180	32.1		12	140 x 220	42.8
5	100 x 180	32.1		13	120 x 160	34.3
6	120 x 180	36.0		14	120 x 160	34.3
7	100 x 200	33.3		15	100 x 180	32.1
8	100 x 180	32.1				

Tabla 6 Dimensiones de macro bloques y su radio hidráulico.

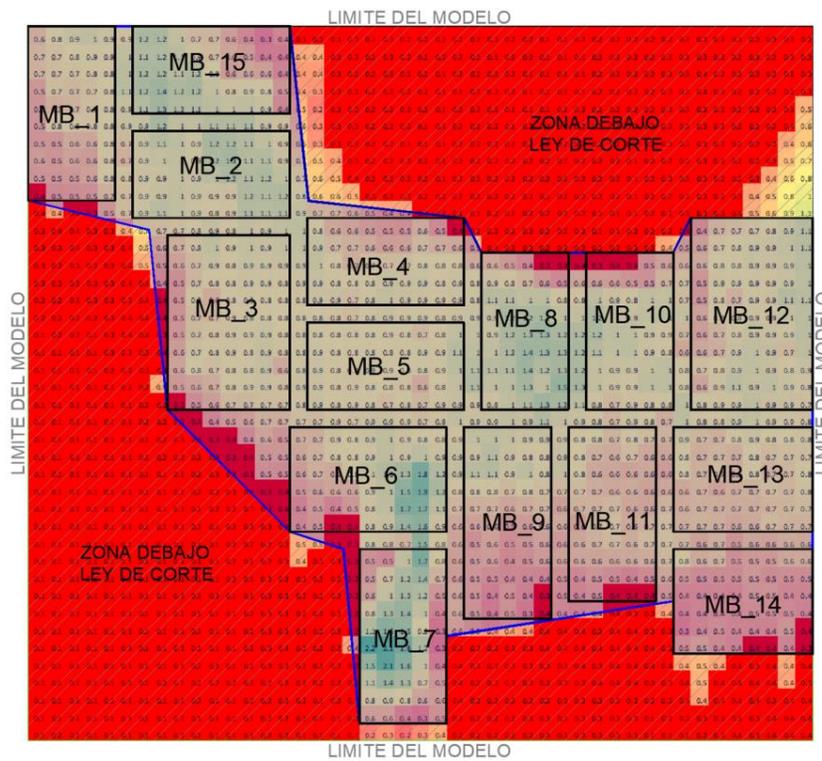


Ilustración 20 Distribución espacial de los macro bloques contenidos en el piso económico.

5.5.- Cálculo de envolvente económica

Una vez determinada la ubicación del piso económico y haberlo dividido en macro bloques, se procede a calcular la envolvente económica de cada uno, según la metodología empleada. Para determinar la envolvente económica, será necesario valorizar los bloques que se encuentren dentro de cada macro bloque, teniendo como envolvente económica final aquella que entregue el máximo valor económico.

5.5.1.- Valorización de reservas en Macro Bloques

Para realizar la valorización de reservas agruparemos todos aquellos bloques que estén ubicados espacialmente a una misma elevación y se encuentren dentro del perímetro del macro bloque, a esta agrupación de bloques la llamaremos Unidad Básica de Extracción (UBE) y estará constituida por un identificador, tonelaje, ley media de cobre, tasa de extracción y beneficio. En la *Ilustración 21*, se puede apreciar como un macro bloque está compuesto por UBE's.

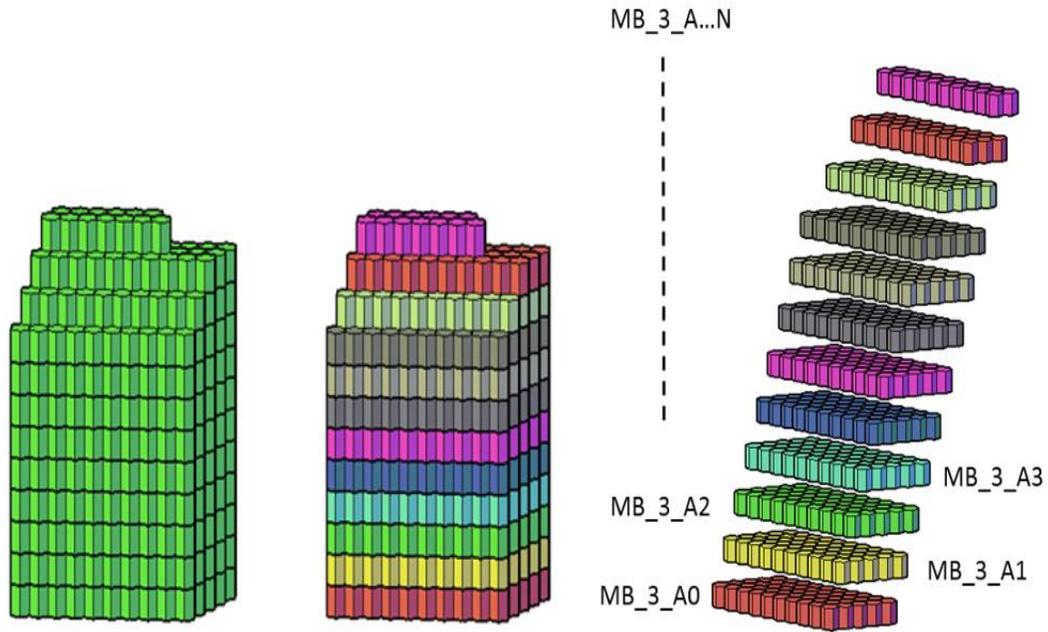


Ilustración 21 Macro bloque compuesto por UBE's

Por otro lado, esta agrupación de bloques en Unidades Básicas de Extracción nos ayudará a disminuir el número de variables, ya que tendrán el mismo comportamiento si trabajamos los bloques por separado o agrupados en UBE's al momento de realizar la optimización con la herramienta UDESS.

5.5.2.- Cálculo del tonelaje en las Unidades Básicas de Extracción

El cálculo del tonelaje de las de las unidades básicas de extracción (UBE) que componen un macro bloque consta de realizar una sumatoria de los tonelajes de los bloques que se encuentren a una misma cota y dentro del perímetro del macro bloque.

La *Ecuación 3* determina como se realiza el cálculo del tonelaje en las UBE contenidas dentro de un macro bloque.

$$T = \sum_{i=1}^n v_i * \rho_i + \dots v_n * \rho_n$$

Ecuación 3 Ecuación utilizada para el cálculo del tonelaje de las UBE.

Donde:

T: tonelaje total de la UBE (ton)

v: volumen del bloque (m³)

ρ: densidad del bloque (ton/m³)

5.5.3.- Ley media de cobre en las Unidades Básicas de Extracción

La ley media de cobre es el porcentaje del metal que está contenido dentro de cada UBE.

La *Ecuación 4* representa cómo se calcula la ley media de cobre de cada una de las UBE.

$$\overline{Ley\ Cu} = \frac{\sum_{n=1}^{i=1} cut\ i * ton\ i + \dots + cut\ n * ton\ n}{\sum_{n=1}^{i=1} ton\ i + \dots + ton\ n}$$

Ecuación 4 Ecuación utilizada para el cálculo de la ley media cobre en las UBE.

Donde:

Ley Cu: ley media de cobre de la UBE (%)

cut: ley de cobre total del bloque (%)

ton: tonelaje del bloque (ton)

5.5.4.- Valorización de Beneficio en las Unidades Básicas de Extracción

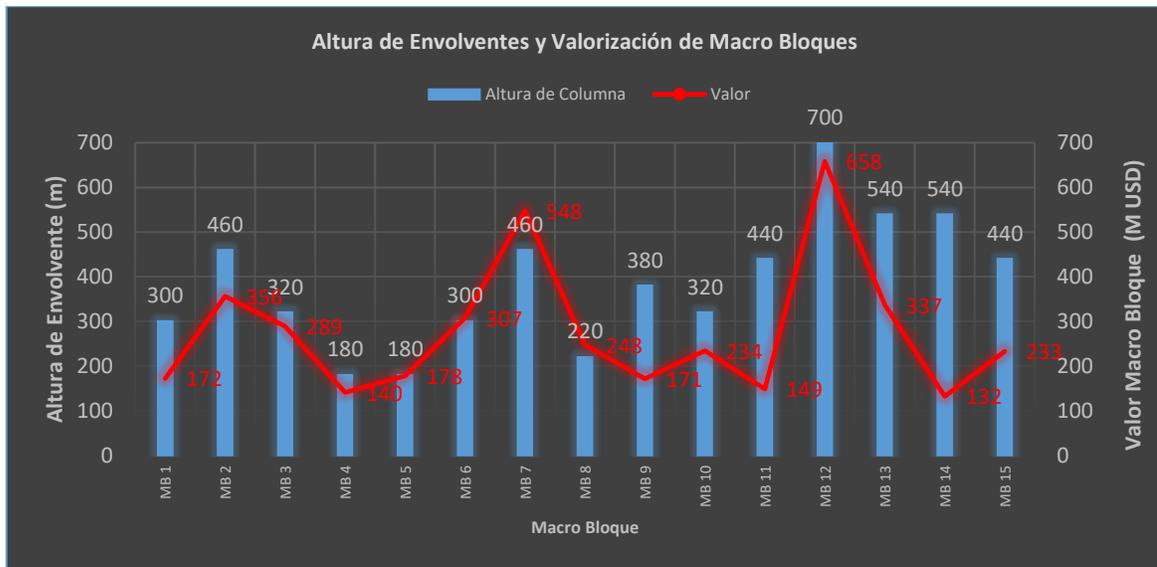
Para realizar la valorización de beneficio de las UBE, será necesario realizar una sumatoria del beneficio de los bloques ubicados a una misma elevación y se encuentren dentro del perímetro del macro bloque.

Esta valorización se realizará mediante dos metodologías como ya se mencionó anteriormente. La primera metodología considera el costo de operación como fijo durante la evaluación, los parámetros técnico económicos de la *Tabla 1* y la *Ecuación 1* para el cálculo.

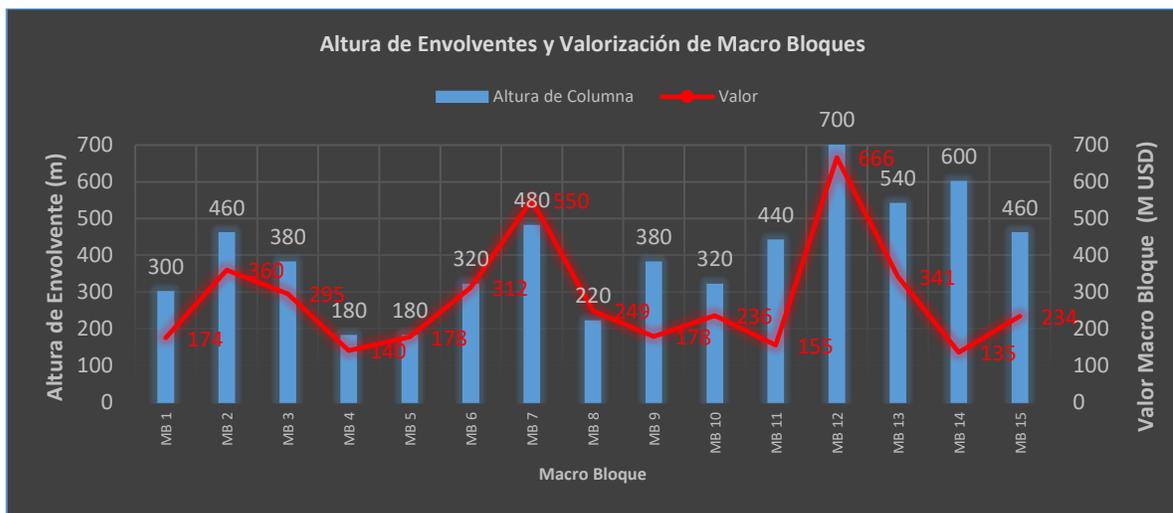
Por otro lado, la segunda metodología desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables. Los costos fijos permanecerán constantes en la valorización debido a que se generan independientemente del nivel de producción que se tenga y los costos variables disminuirán si el nivel productivo o área que entrega producción del macro bloque disminuye. Para valorizar los bloques se utilizaron los costos fijos y costos variables mencionados en la *Tabla 3*, los parámetros técnico económicos mencionados en la *Tabla 1* y la *Ecuación 2*.

5.5.5.- Resumen de valorización y envolventes de Macro Bloques

La *Grafica 5* muestra un resumen de valorización y altura de envolvente de los macro bloques considerando el costo de operación como una variable fija y la *Gráfica 6* presenta el mismo resumen desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables.



Gráfica 5 Alturas de envoltentes y valores económicos de macro bloques considerando el costo de operación como fijo.



Gráfica 6 Alturas de envoltentes y valores económicos de macro bloques desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables.

Adicionalmente en el **capítulo 9.2** de anexo se presenta la curva tonelaje ley de los macro bloques empleados en el agendamiento, en el **capítulo 9.3** de anexo se muestra el resumen de la valorización de las UBE por cada metodología y en el **capítulo 9.4** de anexos se muestra el resumen de la valorización de los macro bloque según la metodología empleada.

5.6.- Velocidades de Extracción

Para establecer las velocidades de extracción es necesario determinar la altura de columna de los macro bloques partiendo de la cota 2,120 donde se ubicó el piso económico. Para simplificar el problema de las velocidades de extracción en los macro bloques, consideraremos el 100% de la altura de columna, aquella altura donde el nivel productivo del macro bloque no haya disminuido.

La *Ilustración 22* muestran cortes a diferentes elevaciones, donde podemos visualizar que el corte a la elevación 2,320 se aprecia una disminución del nivel productivo del macro bloque.

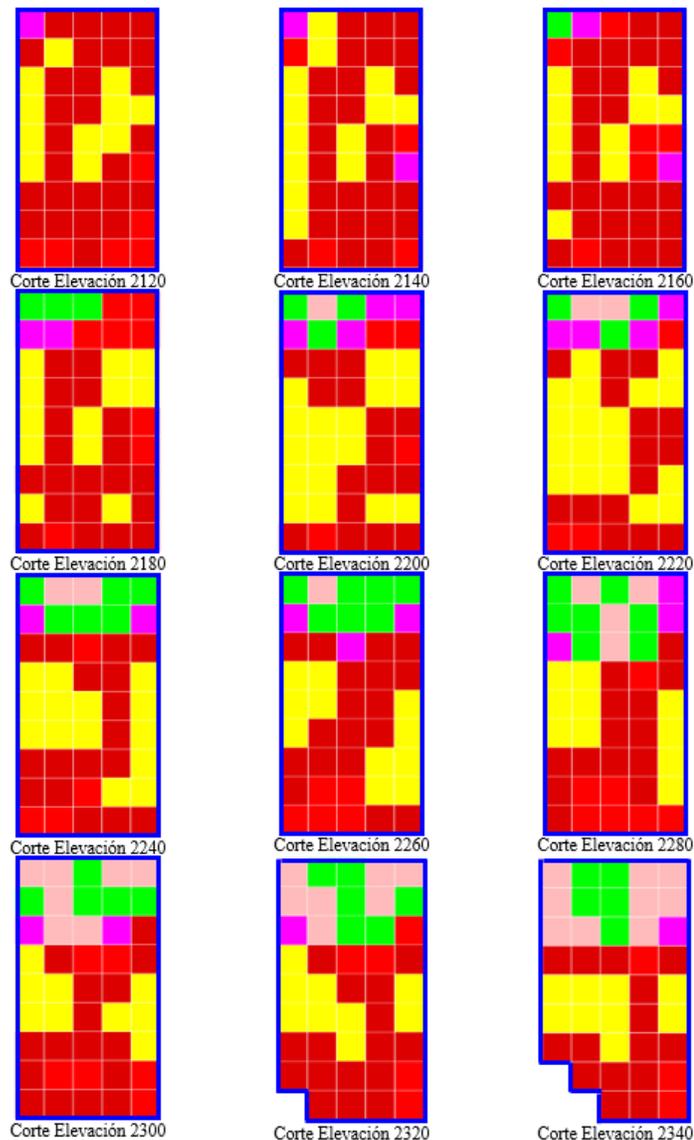


Ilustración 22 Macro bloque con cortes a cada 20 metros donde se delimita en color “Azul” el área que entrega producción.

En el **capítulo 2.4.5** se mencionó que es necesario controlar las velocidades de extracción del material quebrado para evitar colgaduras de material, además, de disminuir la actividad sísmica que se pueda provocar por el quiebre del material. Para poder atacar esta problemática, se considerarán velocidades de extracción bajas al momento de iniciar la extracción de la columna mineralizada, velocidades medias al extraer el 30% de la columna mineralizada y velocidades altas al extraer el 60% de la columna mineralizada. En la *Tabla 7* se muestran las alturas de columna de cada macro bloque y las velocidades de extracción utilizadas para cada uno de ellos.

Macro Bloque	Altura Columna (m)	Velocidad de extracción (Ton/m ² /día)		
		0 a 30% Altura Columna	30 a 60% Altura Columna	60 a 100 % Altura Columna
MB 1	240	0.16	0.35	0.75
MB 2	240			
MB 3	180			
MB 4	180			
MB 5	180			
MB 6	180			
MB 7	360			
MB 8	180			
MB 9	180			
MB 10	200			
MB 11	180			
MB 12	360			
MB 13	300			
MB 14	420			
MB 15	240			

Tabla 7 Alturas de columna de macro bloques y velocidades de extracción utilizadas.

5.7.- Restricciones adicionales

Las restricciones adicionales empleadas en este trabajo son: restricciones de capacidad y restricciones de infraestructura, tratando de simular una explotación de Block Caving explotada por macro bloques.

5.7.1.- Restricciones de capacidad

Las restricciones de capacidad consideraron dos puntos, el primer punto consiste en determinar el nivel productivo que podrían entregar un conjunto de macro bloques en producción y el segundo punto evalúa mediante un catastro si se ha podido alcanzar dicha producción en otros proyectos explotados por Block Caving, determinando una restricción de capacidad de 50 k ton/día.

5.7.2.- Restricciones de infraestructura

Las restricciones de infraestructura consisten en tener preparados cierto número de macro bloques que puedan entregar producción para poder alcanzar la restricción de capacidad propuesta. Para este trabajo se realizaron diversos agendamientos, determinando tener como infraestructura cinco macro bloques que entregarán producción en el periodo de inicio del ramp up; incorporando dos macro bloques después de cada periodo (año) transcurrido hasta alcanzar el régimen de la producción propuesto (50 k ton/día), para poder alcanzar el régimen de producción se requirieron nueve macro bloques entregando producción simultáneamente.

5.8.- Secuencia de minado de Macro Bloques

En el **capítulo 5.5** se realizó una valorización económica de los macro bloques, en el cual se determina el tonelaje, tasa de extracción, ley de media de cobre y beneficio. Una vez determinada la evaluación económica se procede a determinar la secuencia de minado de los macro bloques con el objetivo de maximiza el valor presente neto.

Para determinar la secuencia de minado de los macro bloques, adoptaremos la metodología del costo de oportunidad (De la Huerta [5]). El cual consiste en iniciar la producción con los macro bloques que entreguen mayor beneficio dejando para después los macro bloques que generen menor beneficio.

En la *Ilustración 23*, muestra la distribución espacial de los macro bloques contenidos en el piso económico y una escala de color de ley de cobre, donde las leyes más altas son representadas en color verde y las leyes más bajas son representadas en color rojo.

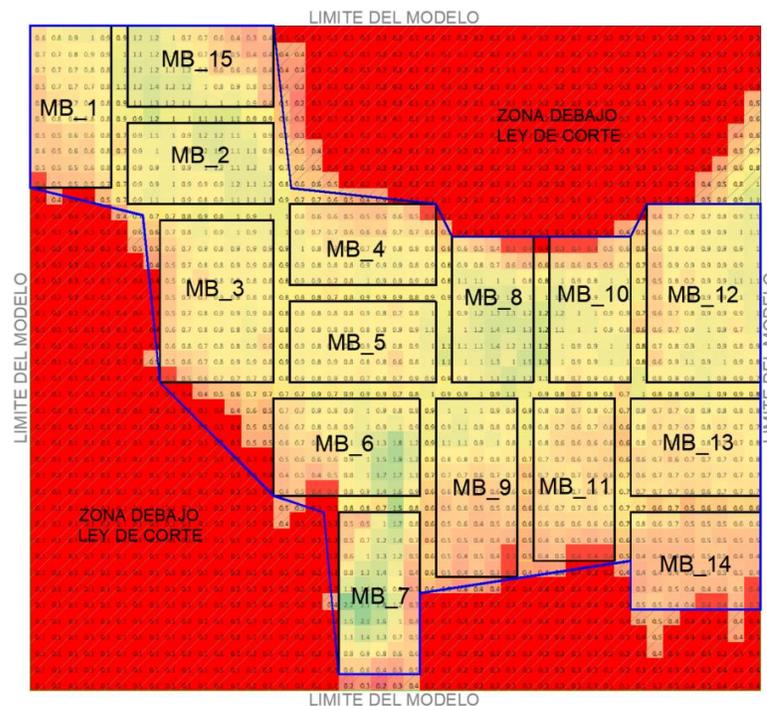


Ilustración 23 Distribución espacial de macro bloques contenidos dentro del piso económico y escala de color de ley de cobre, color “Verde” representa las leyes más altas y el color “Rojo” representa las leyes más bajas.

Una vez valorizados, se determinó la secuencia de minado de los macro bloques según su valor y cumpliendo las restricciones horizontales mencionada en el **capítulo 4.5.1**. La *Ilustración 24* presenta la secuencia de minado de los macro bloques, iniciando el agendamiento con los macro bloques 3, 4, 5, 6, y 7, incorporando al agendamiento después del primer periodo los macro bloques 2 y 15, y después del segundo periodo incorporándose los macro bloques 8 y 9 alcanzando la restricción de nueve macro bloques en producción simultáneamente. Al agotarse alguno de los anteriores, se agregarán en siguiente orden los macro bloques 10, 11, 12, 13, 14 y 1 al agendamiento.

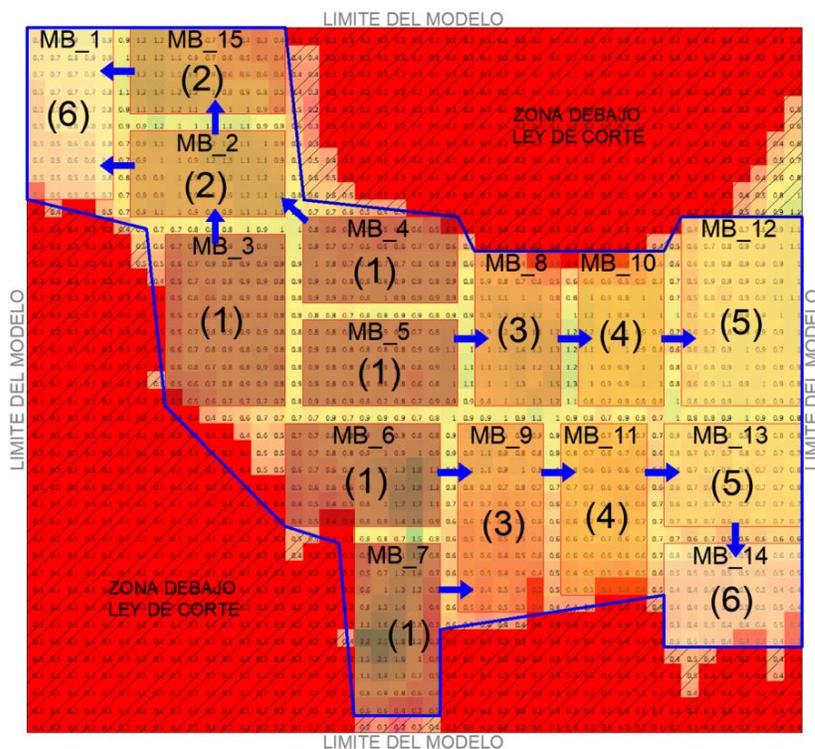


Ilustración 24 Secuencia de minado de macro bloques.

5.9.- Agendamiento Óptimo de Extracción en UDESS

Para realizar el agendamiento óptimo de extracción utilizaremos la herramienta UDESS (Universal Delphos Sequencer and Scheduler) desarrollada en el Laboratorio de Planificación Minera de la Universidad de Chile.

5.9.1.- Archivos de Actividades y Precedencias

La herramienta UDESS requiere un archivo de actividades y un archivo de precedencias para poder realizar el agendamiento. El archivo de actividades está compuesto por unidades básicas de extracción (UBE), donde un conjunto de UBE´s compondrá las reservas de un macro bloque. Cada UBE estará compuesta por un identificador de actividad, tonelaje, ley media de cobre, tasa de extracción y beneficio. La *Tabla 8* muestra una sección del archivo de actividades utilizado en el agendamiento.

ID Actividad	Tonelaje	Ley de CuT %	Beneficio \$	Tasa Extracción
MB_4_A0	997,200	0.896	21,945,441	4.8

Tabla 8 Sección de archivo de actividades.

Hablando del archivo de precedencias, este tiene como objetivo dar orden de inicio y fin a las actividades en el agendamiento. En la *Tabla 9* se muestra una parte del archivo de precedencias y la *Ilustración 25* presenta la descripción gráfica.

Predecesor	Sucesor	Grupo
MB_3_A0	MB_3_A1	3
MB_3_A1	MB_3_A2	3
MB_3_A2	MB_3_A3	3
MB_3_A3	MB_3_A4	3
MB_3_A4	MB_3_AN	3

Tabla 9 Sección de archivo de precedencias.

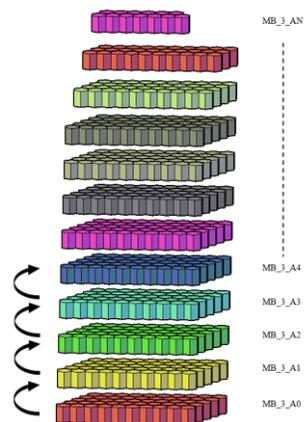


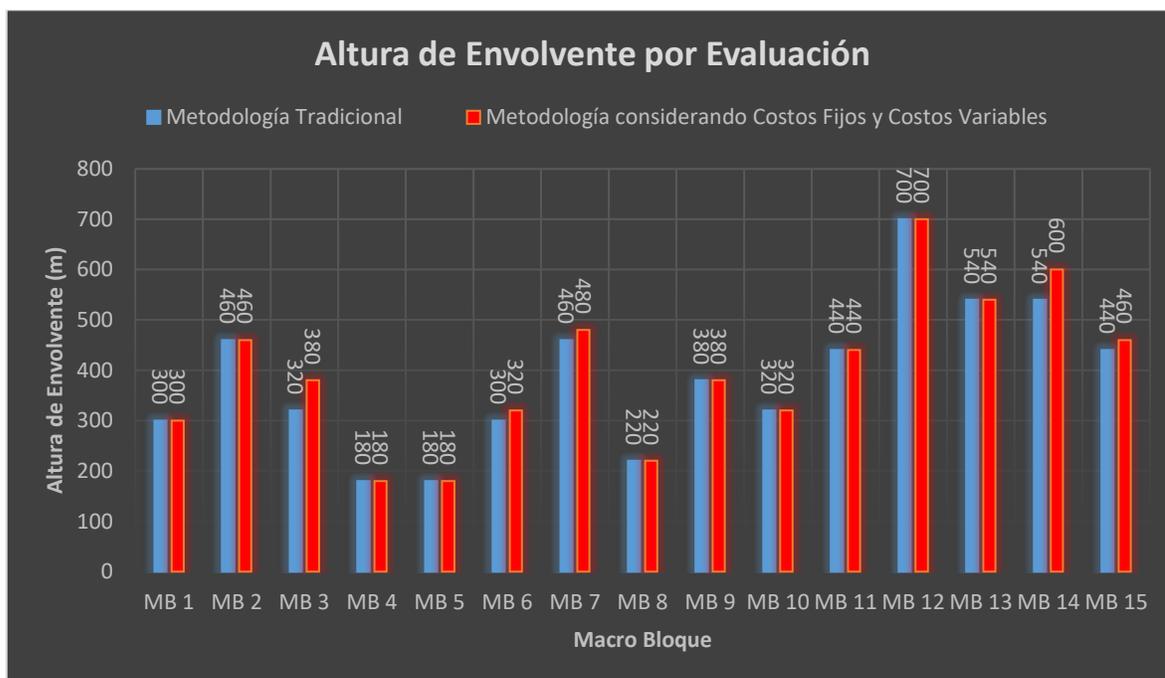
Ilustración 25 Descripción gráfica de precedencias.

En el **capítulo 9.5** de anexos se presentan los archivos de precedencias utilizados en los agendamientos.

6.- Análisis de Resultados

6.1.- Análisis de alturas de Envolvente por macro bloque

Como ya se mencionó anteriormente, este trabajo aborda la evaluación económica de los macro bloques contenidos en el modelo de recursos geológicos mediante dos metodologías, la primera metodología considera el costo de operación como una variable fija en la evaluación; mientras que la segunda metodología desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables tomando en cuenta el nivel productivo del macro bloque que estén entregando producción. La *Gráfica 7* muestra como varía la altura de la envolvente en los macro bloques según la metodología implementada.



Gráfica 7 Altura de columna en macro bloques según su metodología.

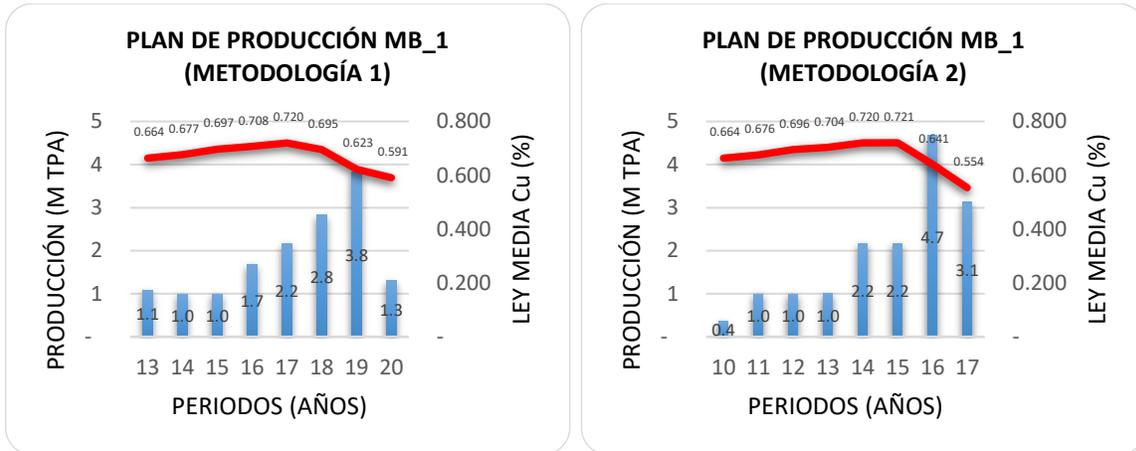
La comparativa entre las dos evaluaciones muestra que hay un aumento de altura de columna en los macro bloques 3, 6, 7, 14 y 15 que fueron evaluados con la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables, esto debido a que al disminuir el nivel productivo de los macro bloques disminuyen los costos variables; lo cual permite agregar reservas al agendamiento.

6.2.- Agendamiento de los macro bloques individualmente en su etapa de producción por metodología

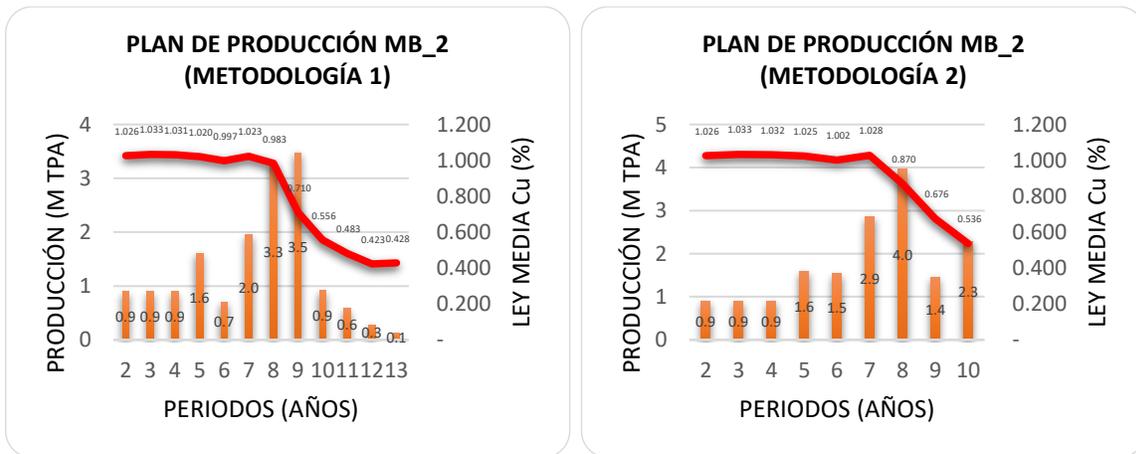
En este apartado visualizamos el agendamiento de los macro bloques en su etapa de producción individualmente.

Las siguientes graficas representan los planes de producción de los macro bloques, visualizando el periodo de inicio y terminación de producción, tonelaje y ley entregada. Para efectos de

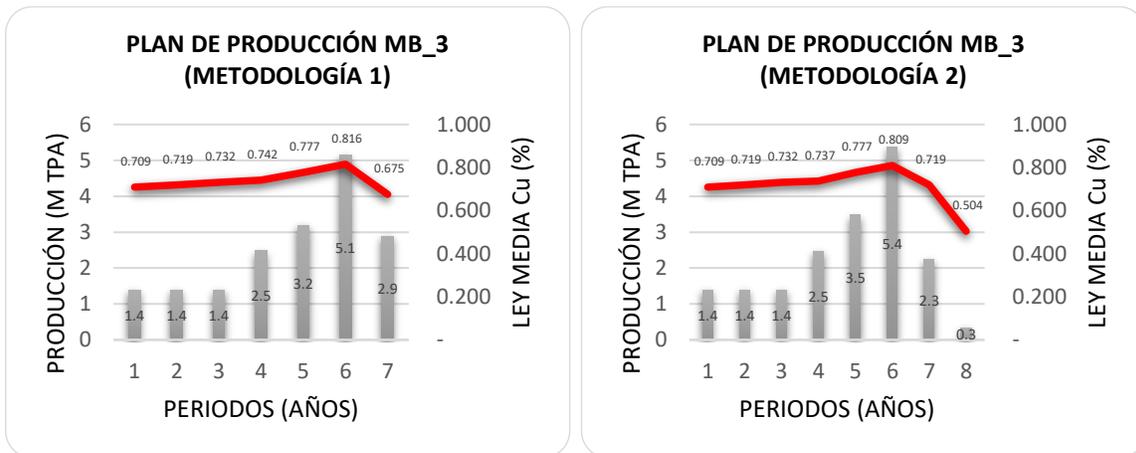
visualización, la metodología 1 considera el costo de operación como fijo y la metodología 2 desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables.



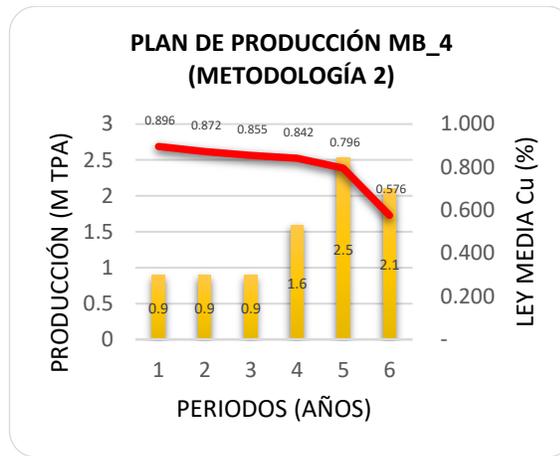
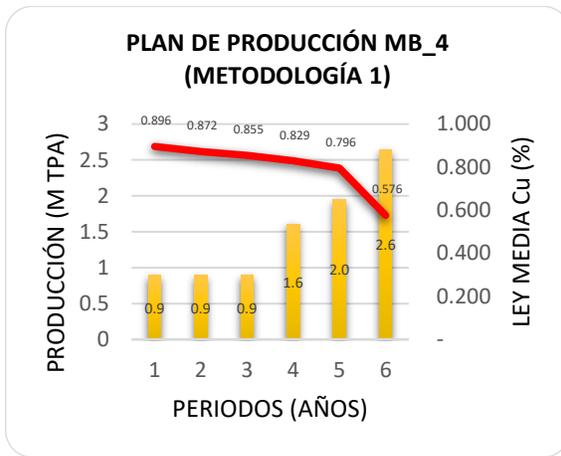
Gráfica 8 Plan de producción de macro bloque 1 según su metodología.



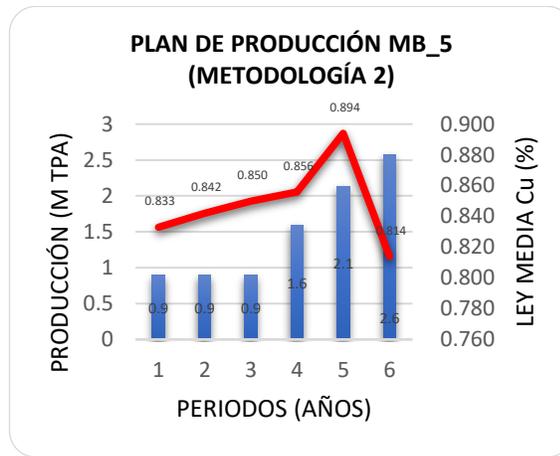
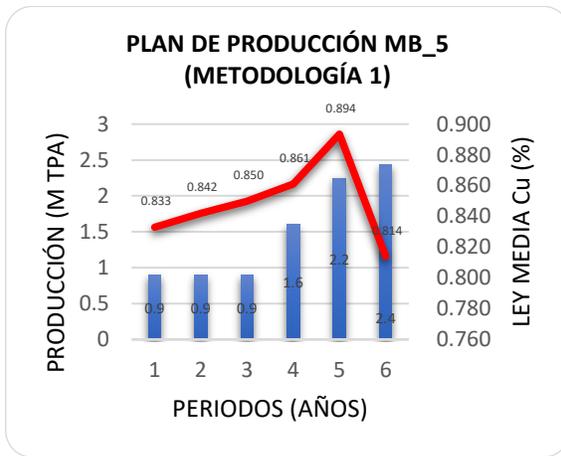
Gráfica 9 Plan de producción de macro bloque 2 según su metodología.



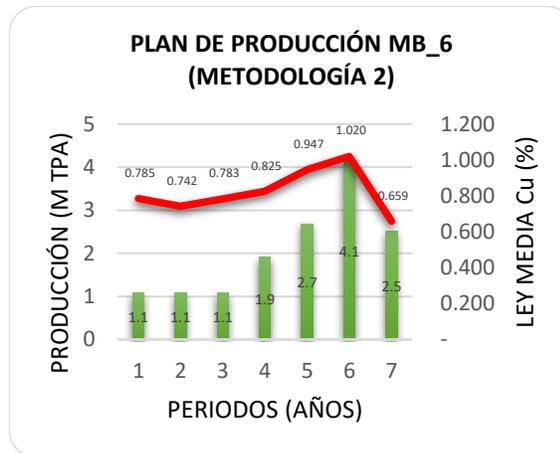
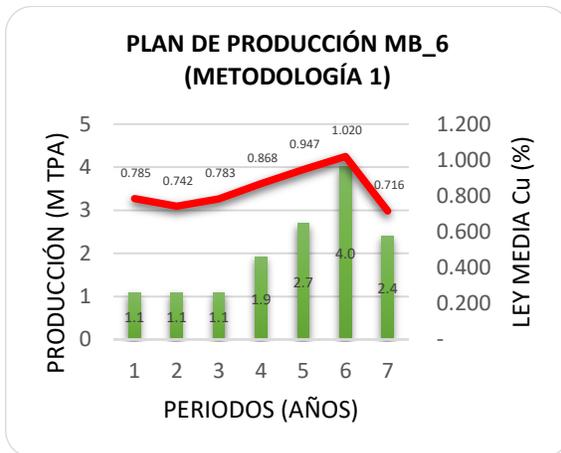
Gráfica 10 Plan de producción de macro bloque 3 según su metodología.



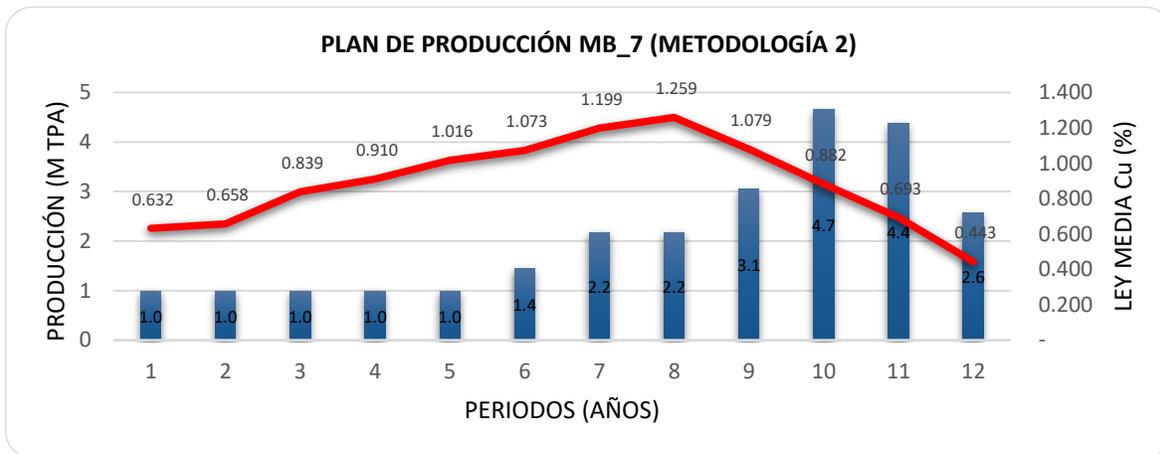
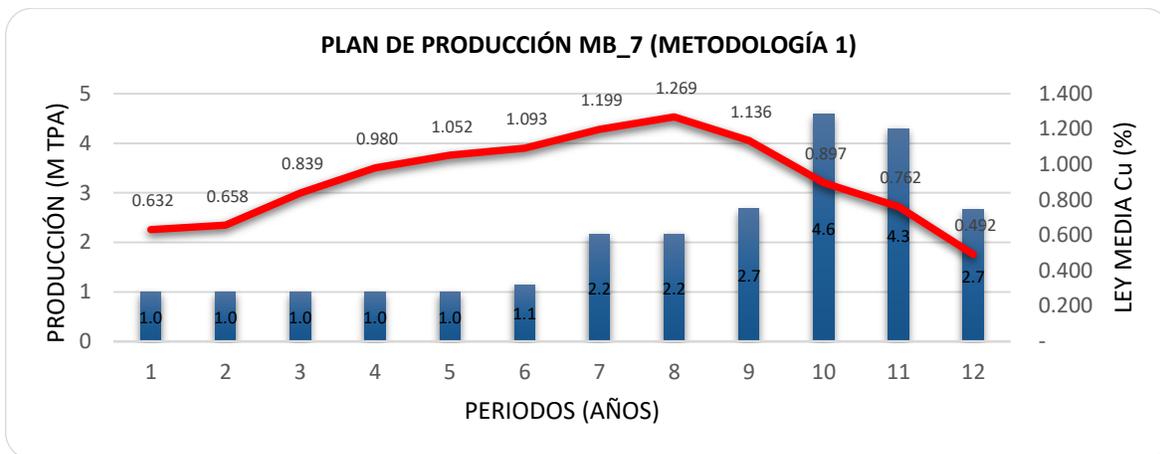
Gráfica 11 Plan de producción de macro bloque 4 según su metodología.



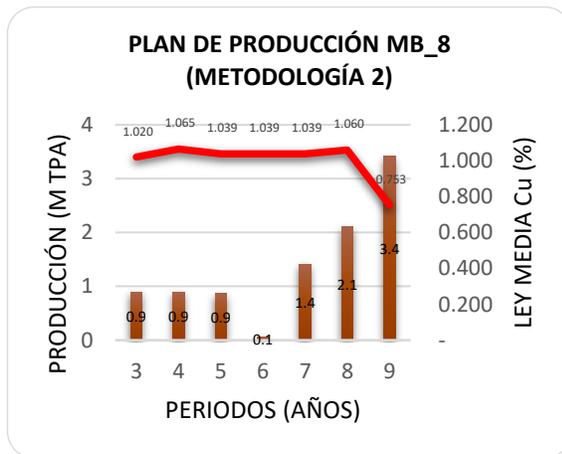
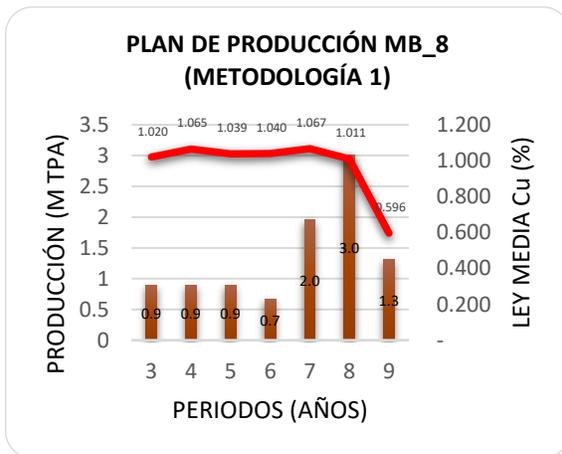
Gráfica 12 Plan de producción de macro bloque 5 según su metodología.



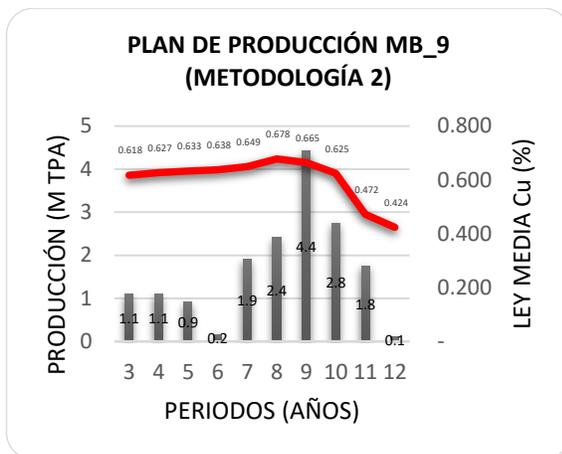
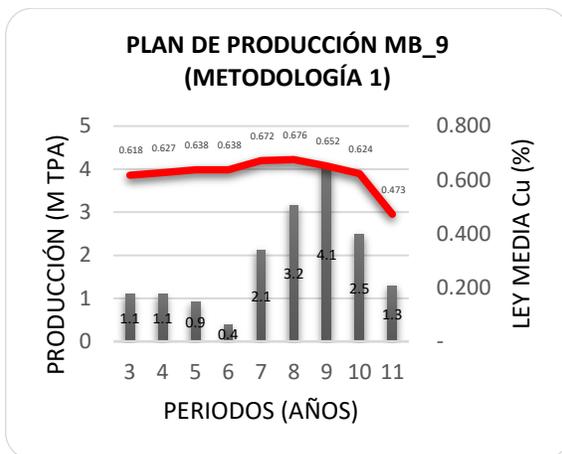
Gráfica 13 Plan de producción de macro bloque 6 según su metodología.



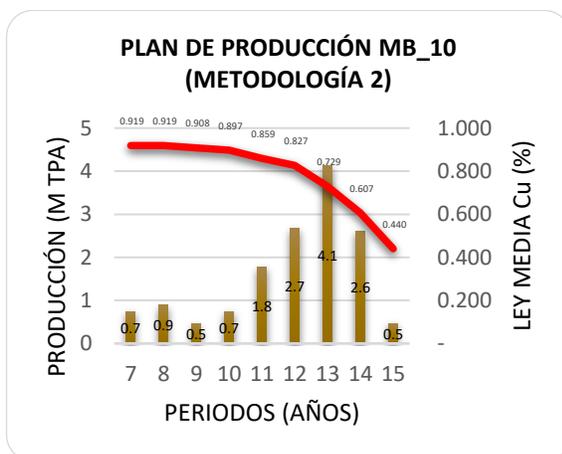
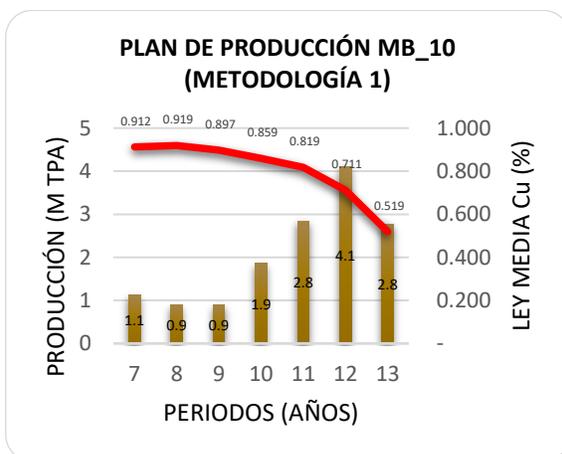
Gráfica 14 Plan de producción de macro bloque 7 según su metodología.



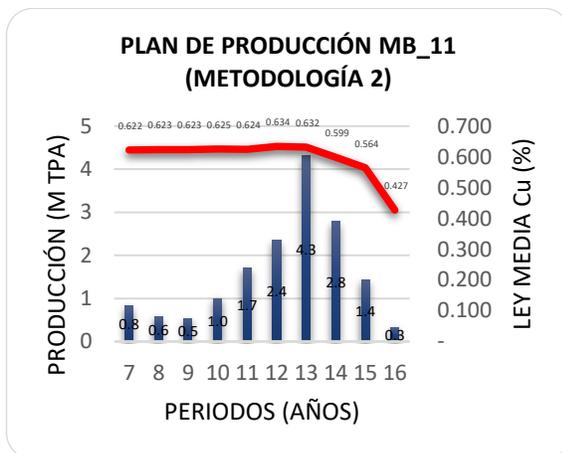
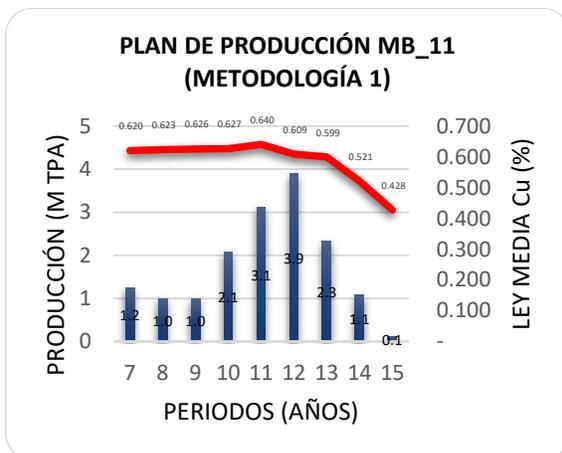
Gráfica 15 Plan de producción de macro bloque 8 según su metodología.



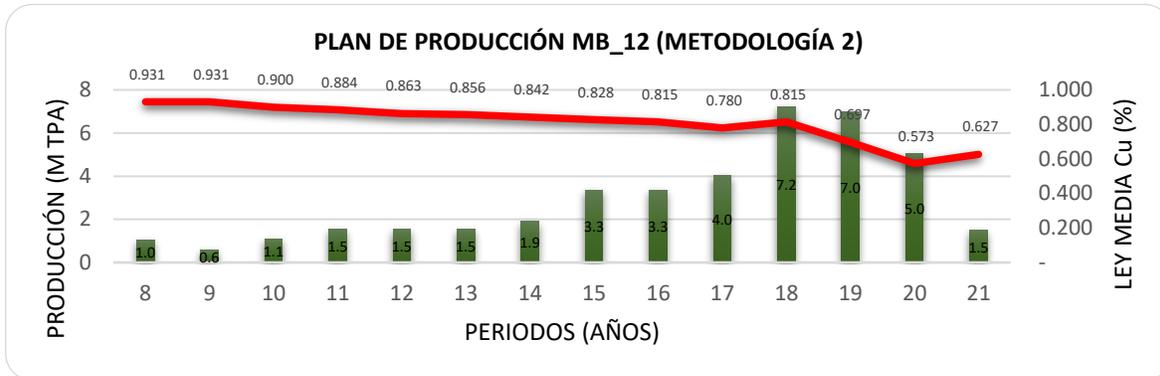
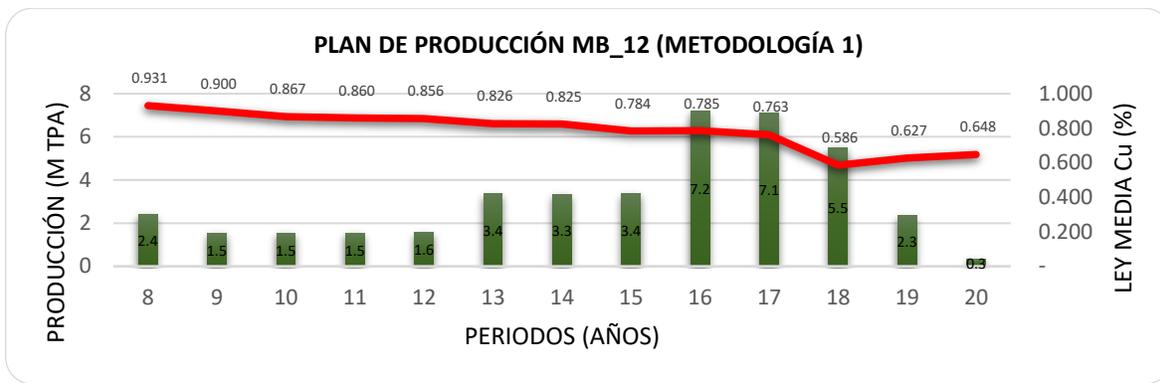
Gráfica 16 Plan de producción de macro bloque 9 según su metodología.



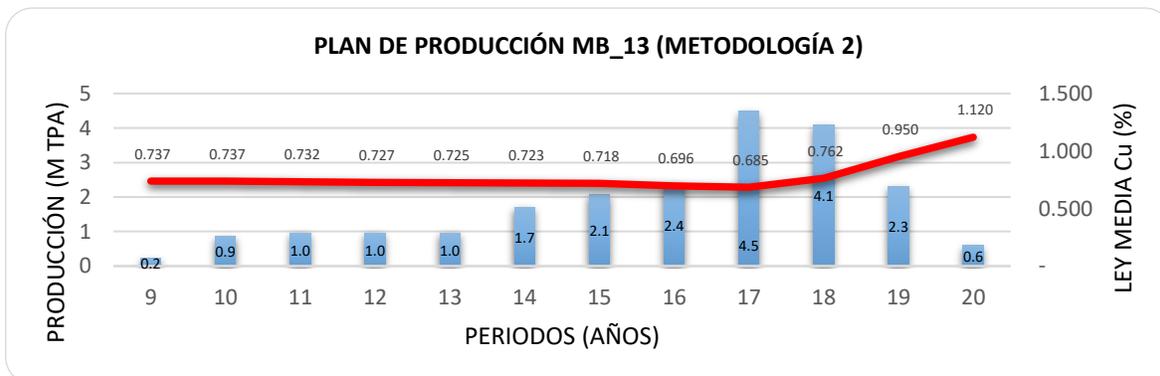
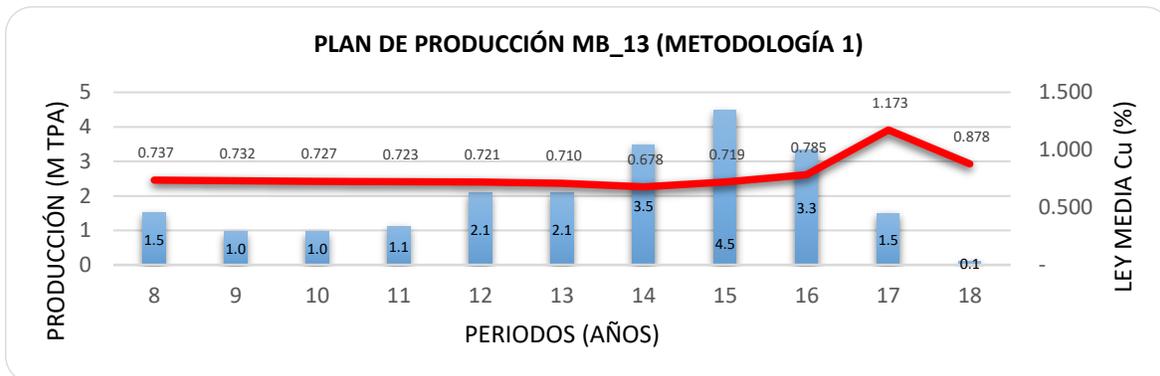
Gráfica 17 Plan de producción de macro bloque 10 según su metodología.



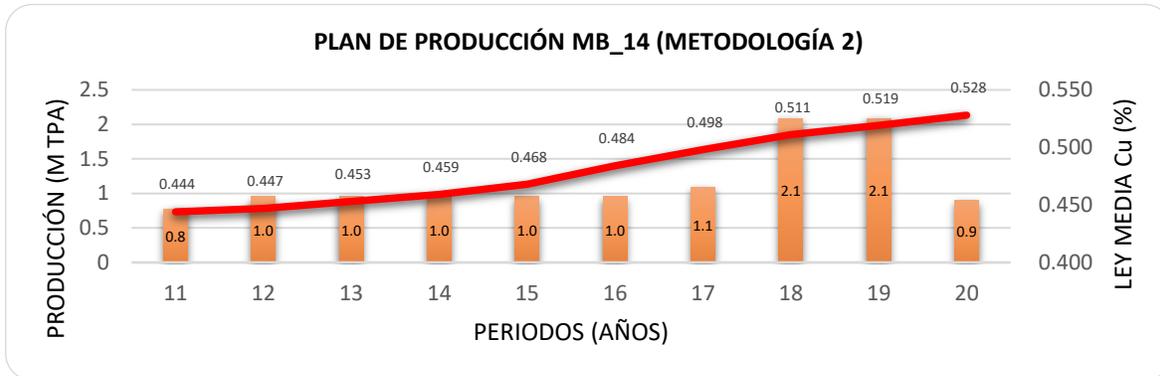
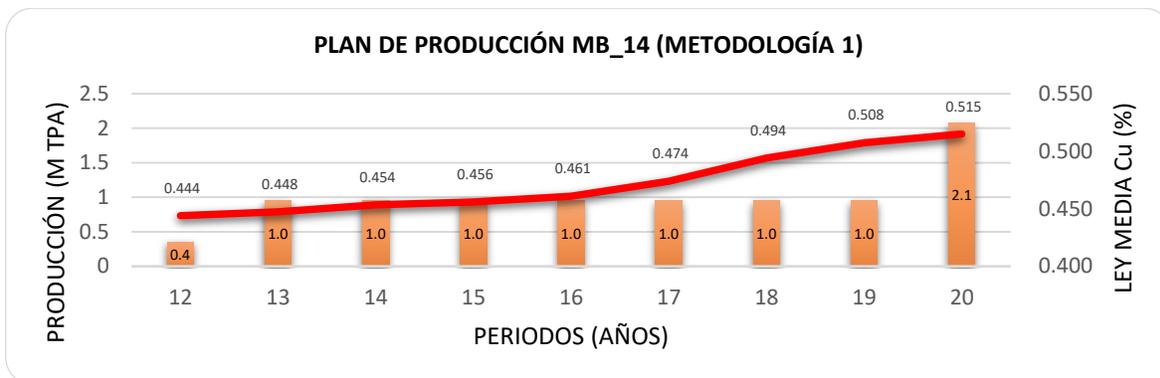
Gráfica 18 Plan de producción de macro bloque 11 según su metodología.



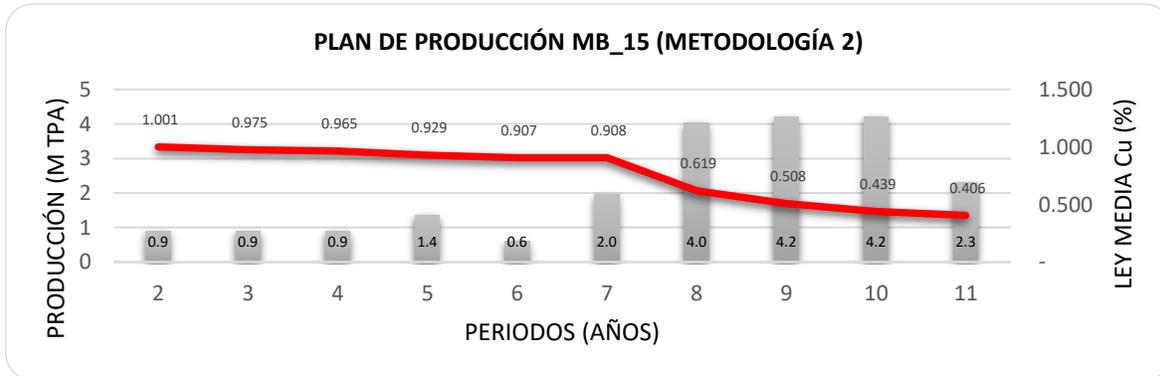
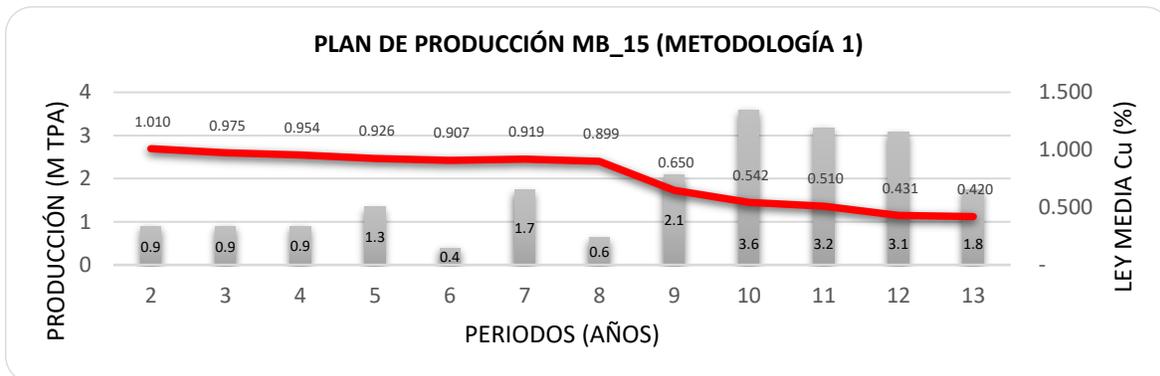
Gráfica 19 Plan de producción de macro bloque 12 según su metodología.



Gráfica 20 Plan de producción de macro bloque 13 según su metodología.



Gráfica 21 Plan de producción de macro bloque 14 según su metodología.



Gráfica 22 Plan de producción de macro bloque 15 según su metodología.

Los planes de producción de los macro bloques muestran un comportamiento similar en el tonelaje extraído y ley media de cobre por periodo, este comportamiento es debido a que ambas metodologías utilizan las mismas restricciones en el agendamiento.

Refiriéndonos a la ley media de cobre, los macro bloques 2, 4, 8, 9, 10, 11, 12 y 15 entregan una mejor ley al inicio del agendamiento y entregando para el final las leyes más bajas. Por otra parte, los macro bloques 1, 3, 5, 6, 7, 13 y 14 entregan leyes de cobre menores al inicio y mejores leyes al final; esto debido a que las mejores leyes en estos macro bloques se encuentran a una elevación más alta a la que se ubicó el piso económico.

Otro punto importante que hay que destacar es la duración del agendamiento en las metodologías, donde la metodología que considera el costo de operación como una variable fija tiene una duración de 20 periodos, mientras que la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables consta de 21 periodos. Esto debido a que la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables agrega más reservas al plan.

6.3.- Duración de los macro bloques en el agendamiento

El inicio y terminación de la producción de los macro bloques varían según su metodología; la *Tabla 10* muestra el inicio, fin y duración de la producción en los macro bloques.

	MB_1			MB_2			MB_3			MB_4			MB_5		
	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN COMO UNA VARIABLE FIJA	13	20	8	2	13	12	1	7	7	1	6	6	1	6	6
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN DESGLOSADO EN COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES	10	17	8	2	10	9	1	8	8	1	6	6	1	6	6
	MB_6			MB_7			MB_8			MB_9			MB_10		
	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN COMO UNA VARIABLE DETERMINISTA	1	7	7	1	12	12	3	9	7	3	11	9	7	13	7
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN DESGLOSADO EN COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES	1	7	7	1	12	12	3	9	7	3	12	10	7	15	9
	MB_11			MB_12			MB_13			MB_14			MB_15		
	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D	I	T	D
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN COMO UNA VARIABLE DETERMINISTA	7	15	9	8	20	13	8	18	11	12	20	9	2	13	12
METODOLOGÍA COSTO DE OPERACIÓN DESGLOSADO EN COSTOS FIJOS Y COSTOS VARIABLES	7	16	10	8	21	14	9	20	12	11	20	10	2	11	10

Tabla 10 Periodo de inicio de minado (I), Periodo de terminación de minado (T) y Duración de la producción de los macro bloques (D).

Analizando la tabla anterior podemos identificar que hay un desfase en los periodos de inicio y fin de los macro bloques por metodología, esto debido a que la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables incorpora una mayor cantidad de reservas extraíbles en algunos macrobloques.

6.4.- Análisis del agendamiento

El agendamiento realizado con la metodología que considera los costos de operación como una variable fija, entrega un plan de producción con una duración de 20 periodos.

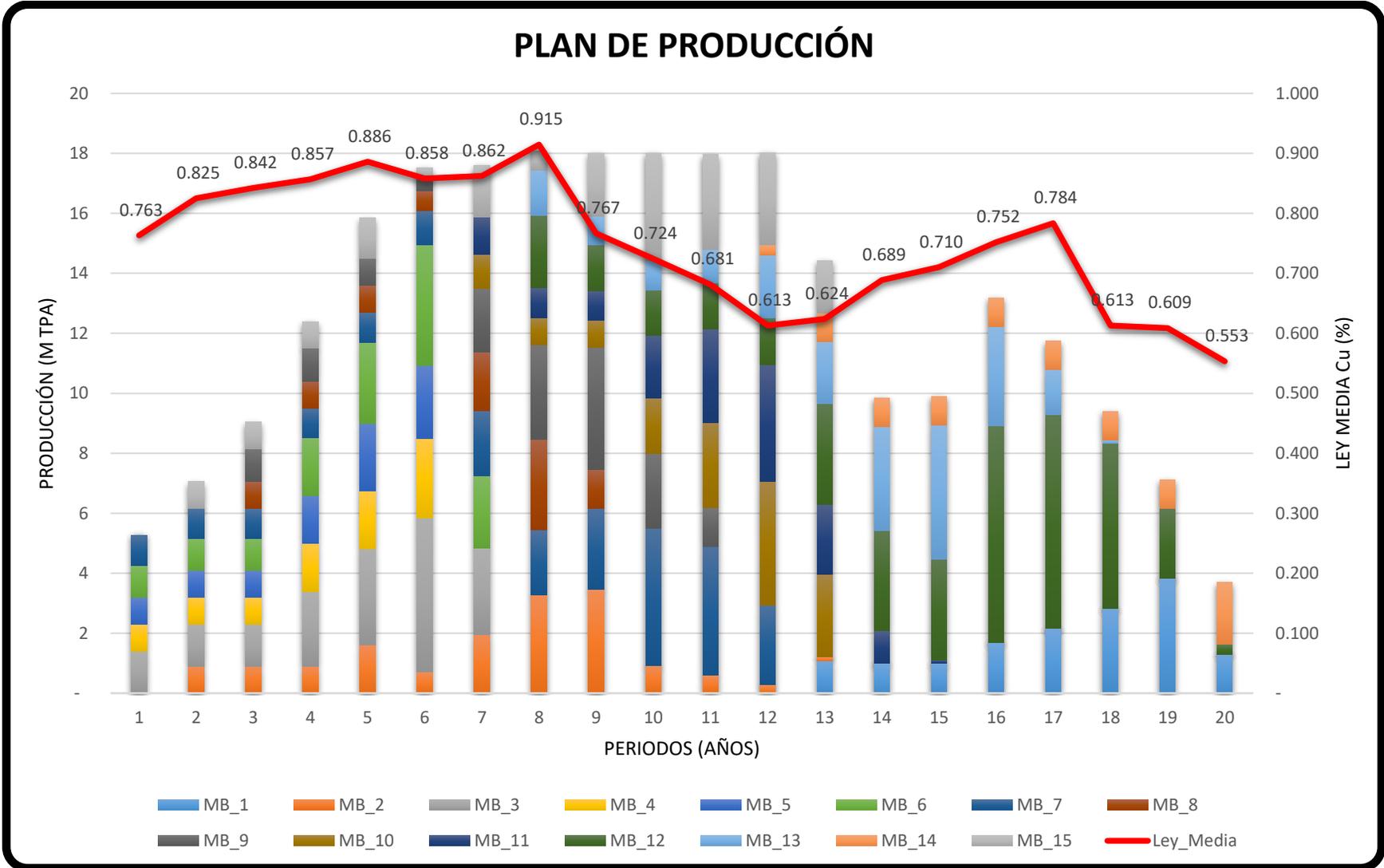
El plan de producción entregado tiene un aumento paulatino en la producción durante cinco periodos (Ramp Up), alcanzando su capacidad máxima de producción en el periodo seis (18 MDT); manteniendo una producción en régimen por siete periodos, para posteriormente tener un descenso en la producción durante ocho periodos (Ramp Down) hasta agotar las reservas extraíbles. La *Gráfica 23* muestra el plan de producción de la primera metodología.

Por otro lado, los resultados de la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables entrega un plan de producción de 21 periodos.

El plan de producción obtenido por el segundo agendamiento tiene un aumento paulatino en la producción por cinco periodos (Ramp Up), logrando su capacidad máxima de producción en el periodo seis (18 MDT); manteniendo una producción en régimen durante seis periodos, para posteriormente tener un descenso en la producción durante diez periodos (Ramp Down) hasta extraer el total de reservas. El plan de producción descrito anteriormente se puede visualizar en la *Gráfica 24*.

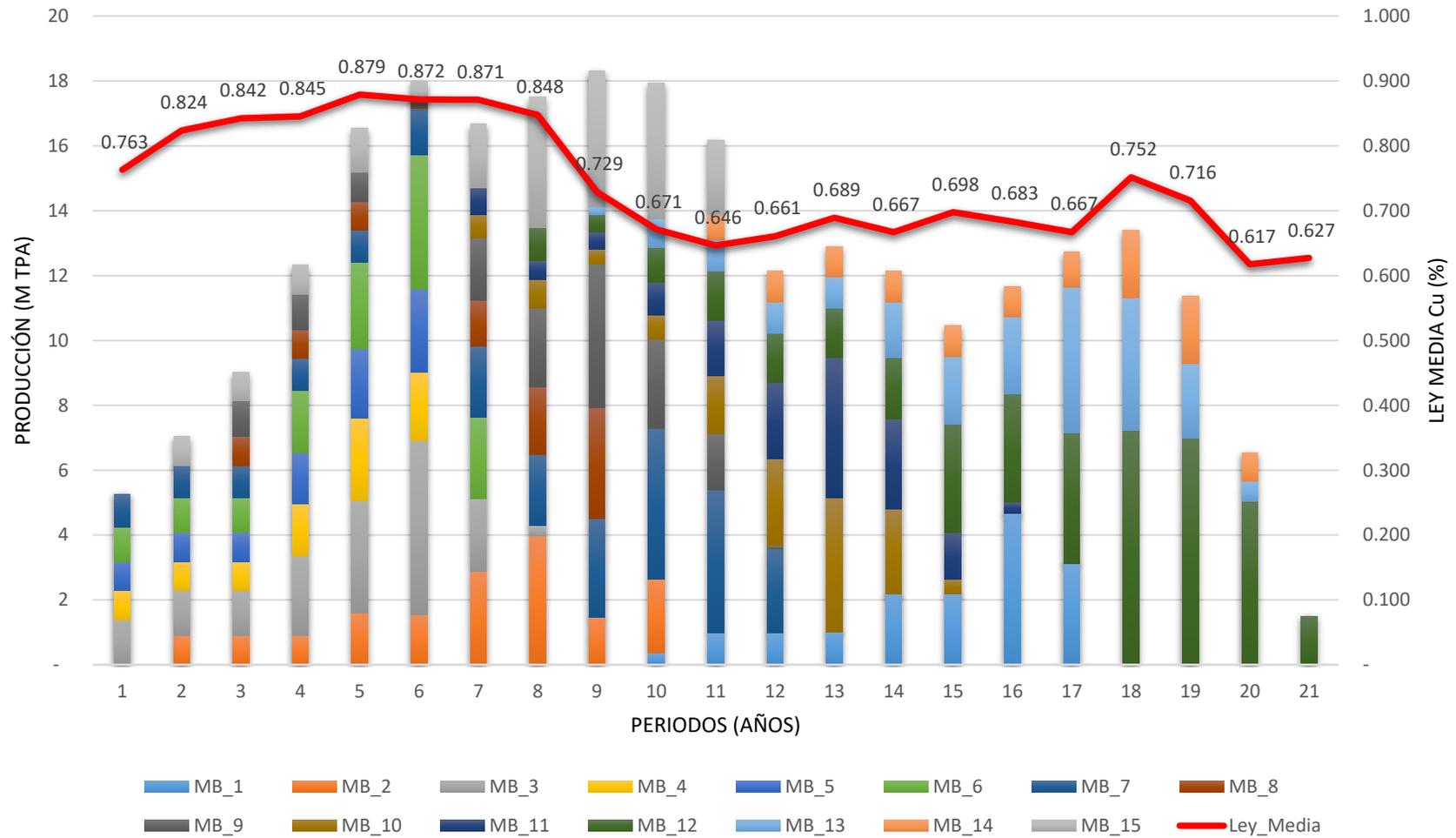
Cabe destacar que el primer agendamiento tiene descensos y aumentos en la producción la etapa de Ramp Down de la producción; mientras que el segundo plan de producción presenta un comportamiento más uniforme en dicha etapa, tratando de mantener una producción que disminuye paulatinamente hasta agotar los recursos.

Tomando en consideración el comportamiento de la ley media de cobre total en cada uno de los agendamientos, podemos observar que son muy similares, donde los recursos de mejor ley son extraídos en los primeros periodos; dejando para los periodos finales las leyes de menor valor. Dicho comportamiento de la ley media de cobre es debido a que se tiene la misma secuencia de minado entre los macro bloques. Es importante destacar, que el comportamiento de las leyes medias es más uniforme pero ligeramente menor en el plan de producción entregado por la segunda metodología, esto debido a que se incorporan al plan más reservas, pero de menor ley.



Gráfica 23 Plan de producción entregado por la primera metodología que considera el Costo de Minado como una variable determinista, compuesto por 15 macro bloques.

PLAN DE PRODUCCIÓN



Gráfica 24 Plan de producción entregado por la segunda metodología que desglosa el Costo de Minado en Costos Fijos y Costos Variables, compuesto por 15 macro bloques.

Analizando los resultados de las valorizaciones de los macro bloques en ambas metodologías, la *Tabla 11* muestra las diferencias asociadas a las reservas extraídas, ley de media de cobre y beneficio.

	Reservas extraídas (ton)	Ley Media Cu (%)	Beneficio \$
Metodología 1	273,825,852	0.743	4,152,043,597
Metodología 2	278,708,212	0.737	4,203,727,001
Diferencia	4,882,360	0.006	51,683,404

Tabla 11 Resumen de valorización de reservas extraídas, ley media de cobre y beneficio por metodología.

7.- Conclusiones

7.1.- Planificación minera en Block Caving explotado por macro bloques

En el análisis bibliográfico, diversos trabajos se han basado en la planificación minera por métodos de hundimiento tratando de incorporar diversos parámetros que puedan afectar el ciclo de minado. Algunos trabajos han tratado de incorporar a los planes mineros interferencias operacionales, efectos de la hundibilidad en el macizo rocoso, mantener pilares que contengan posible material diluyente, interferencias operacionales, problemáticas en el manejo de materiales y colgaduras en puntos de extracción; evaluando el impacto que puedan tener en la planificación minera.

Refiriéndonos a los parámetros de costos, la bibliografía consultada utiliza la metodología de valorización de reservas implementando los parámetros técnicos y económicos de una manera determinista. Motivado por lo anterior, este trabajo incorpora el comportamiento que tienen los costos durante la operación minera; desglosando el costo de operación en costos fijos y costos variables incorporando el nivel productivo de los macro bloques lo largo del agendamiento, el cual permite evaluar de manera más exacta el valor que podría tener un proyecto.

7.2.- Metodologías para incorporar los costos de minado a la planificación

En este trabajo se evalúan dos metodologías para valorizar las reservas contenidas dentro del modelo de recursos geológicos. La primera metodología desarrolla la valorización utilizada tradicionalmente, donde el costo de operación es considerando como una variable constante sin tomar en cuenta el nivel productivo que se tenga. La segunda metodología desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables, donde los costos fijos están compuestos por costos de supervisión, equipo de operación, bombeo y administrativos, por otro lado, los costos variables están compuestos por costos de ventilación y desarrollo de actividades auxiliares, los cuales estarán ligados al nivel productivo que se este desarrollando.

Ambas metodologías tienen el mismo enfoque de crear agendamientos con las reservas contenidas en el modelo de recursos geológicos. Sin embargo, al realizar la valorización de reservas se tienen diferencias entre ellas. La metodología tradicional que considera el costo de operación como una variable fija incluye menos reservas al agendamiento, mientras que la metodología que desglosa el costo de operación en costos fijos y costos variables agrega más reservas, esto debido a que si disminuye el nivel productivo en los macro bloques disminuirán los costos variables, lo cual permite tener una ley de corte más baja al momento de valorizar las reservas.

7.3.- Caso de estudio

El tonelaje extraído en el plan de producción de la segunda metodología es 1.75% mayor que la primera metodología.

Comparando la ley media de cobre, la segunda metodología entrega una ley 0.006% más baja que la primera metodología; esto debido a que incorpora más reservas al plan, pero con una ley más baja. Comparando el comportamiento de las leyes por periodo en las dos metodologías, el comportamiento en la segunda metodología se tiene menos variabilidad.

Comparando el beneficio en ambas metodologías, la segunda metodología entrega 51.5 MDD (1.25%) más que la primera metodología.

Ambas metodologías empleadas presentan comportamientos similares, extrayendo las leyes de mayor valor en los primeros periodos y misma duración de periodos para alcanzar el régimen de la producción. Teniendo diferencias en la duración del plan, donde la primera metodología tiene una duración de 20 periodos y la segunda metodología tiene una duración de 21 periodos.

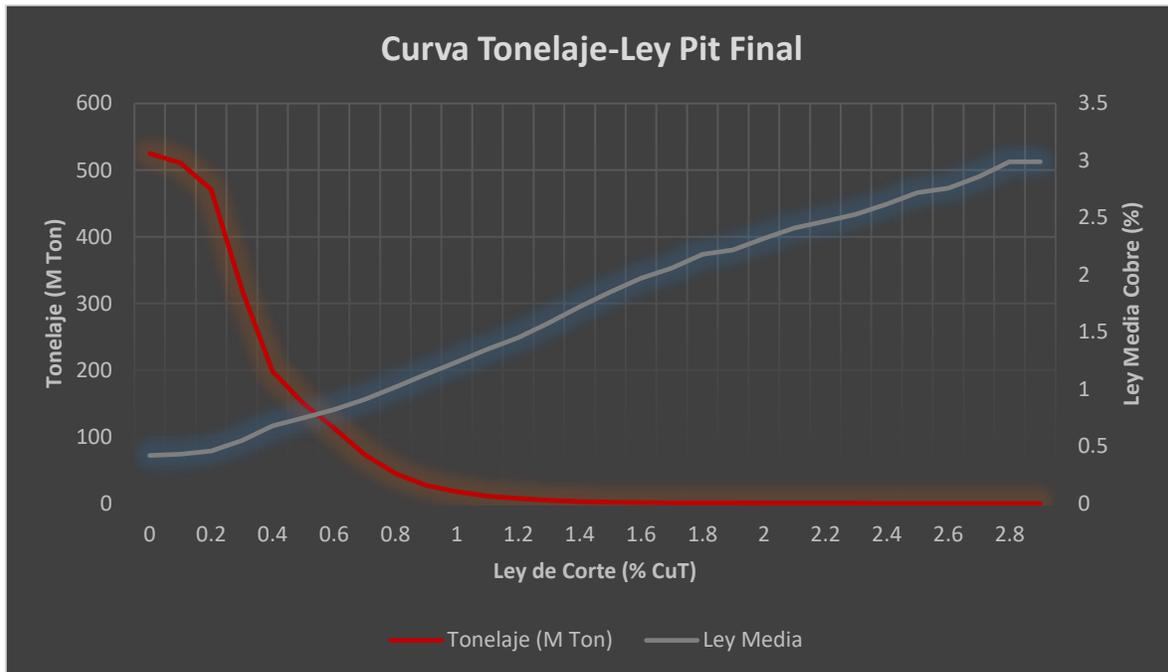
8.- Antecedentes bibliográficos

- (1) Caro Rodrigo et al. (2013), “An integrated approach to the long-term planning process in the copper mining industry”.
- (2) Vargas Emilio. (2014), “Cálculo de envolvente económica para minas de caving bajo incertidumbre geológica”.
- (3) S Fuentes et al. (2008), “Chuquicamata underground mine – project status update”.
- (4) Arriagada Francisca. (2015), “Secuenciamiento optimizado considerando regla de mezcla”.
- (5) De la Huerta. (1994), “Aplicación del criterio de costo de oportunidad en la planificación de producción de minas subterráneas”.
- (6) Rubio Enrique. (1998), “Long-term planning of block caving operations using mathematical programming tools”.
- (7) Laubscher D. (1994), “Cave mining - the state of the art”.
- (8) Rocher Winston (2012), “Secuenciamiento óptimo de preparación minera subterránea”.
- (9) Jean Michel Rendu (2014), “An introduction to CUT-OFF grade estimation”. 2nd Edition.
- (10) Victor Rudenno (2012), “The mining valuation handbook”.
- (11) E. T. Brown (2010), “Block caving geomechanics”.
- (12) Laubscher D. (2011), “Cave mining”, SME Mining Engineering Handbook 3rd Edition.
- (13) Fuentes S., Villegas F. (2014), “Block caving using macro blocks”, Caving 2014.
- (14) Villa D. (2014) “Mine sequence optimization for block caving using concept best-worst case”.
- (15) Yanza Vergara (2014), “Altura de columna en block/panel caving”.
- (16) Arancibia Ernesto and others (2009), “Development of a gravity flow numerical model for the evaluation of drawpoints spacing for block/panel caving”.
- (17) Cornejo J. (2016). “Diseño y planificación minera subterránea en métodos de hundimiento”.
- (18) Lerchs H. and Grossman I. (1964), “Optimum design of open-pit mines” Trans Canadian Institute of Mining and Metallurgy.
- (19) Arancibia Ernesto (2016). “Curso sistemas mineros enfocado a la introducción de los diferentes métodos de minado subterráneo”.
- (20) Brannon, C. et al (2011). Block caving. SME Mining Engineering Handbook.
- (21) Johnson, T. (1969), “Optimum production scheduling”, in Proceedings of the 8th International Symposium on Computers and Operations Research, p. 539 – 562
- (22) Sanchez (2013), “Modelos cuantitativos de gestión del riesgo asociado a variables intrínsecas del proceso de diseño del método de explotación por hundimiento”.

- (23) Ferrada (2013), “Recuperación pilar oeste Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea”.
- (24) Jiménez (2014), “Teoría de selección de portafolios aplicada al rubro de la minería subterránea con el método de explotación block caving en la selección de macrobloques para un plan de producción en un horizonte de largo plazo”.
- (25) Paredes (2018), “Chuquicamata underground mine design: the simplification of the ore handling system of Lift 1”
- (26) Hormazabal (2018), “Geomechanical evaluation of caving macro-block options at Chuquicamata Underground Project in Chile using three-dimensional numerical modelling”.
- (27) Castro et al (2018), “Hang-up analysis and modelling for Cadia East PC1-S1 and PC2-S1”.
- (28) Flores et al (2018), “A transition from a large open pit into a novel macroblock variant block caving geometry at Chuquicamata mine, Codelco Chile”.
- (29) Vergara (2015), “Modelo de costo basado en actividades para la gestión de operaciones de una mina subterránea explotada por block caving”.
- (30) CODELCO (2010), “Pre-acondicionamiento del macizo rocoso”.
- (31) Osanloo et al (2008). “Long-term open pit mine production planning: a review of models and algorithms”.

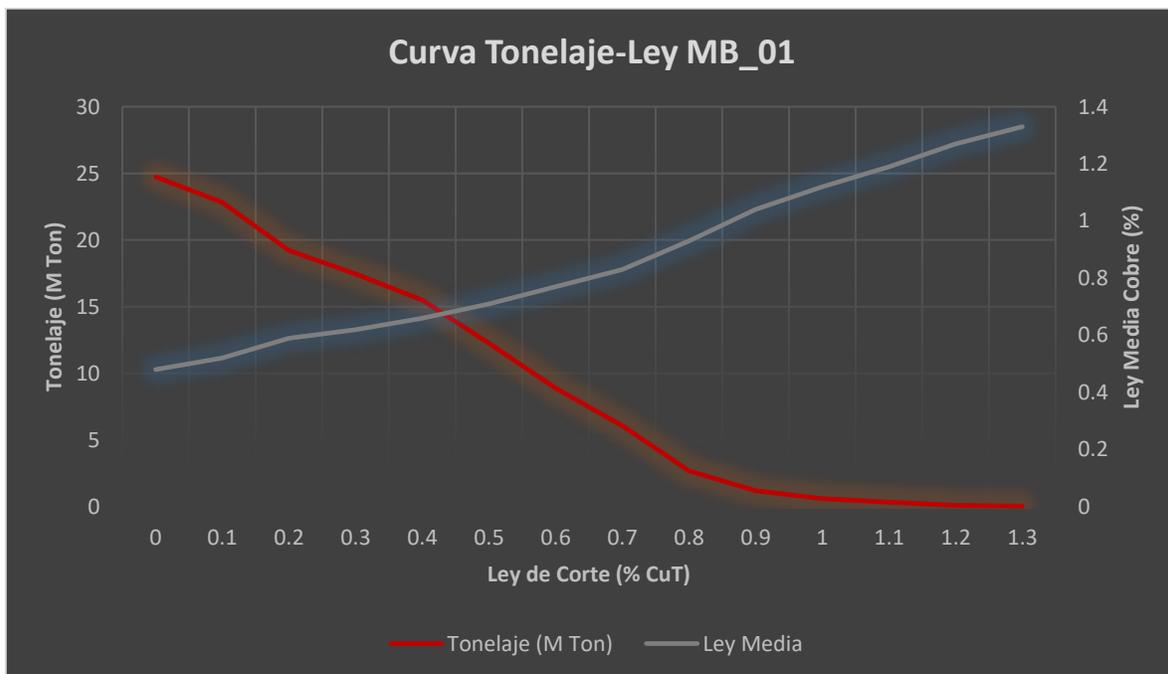
9.- Anexos

9.1.- Anexo A: Curvas Tonelaje Ley de Pit Final

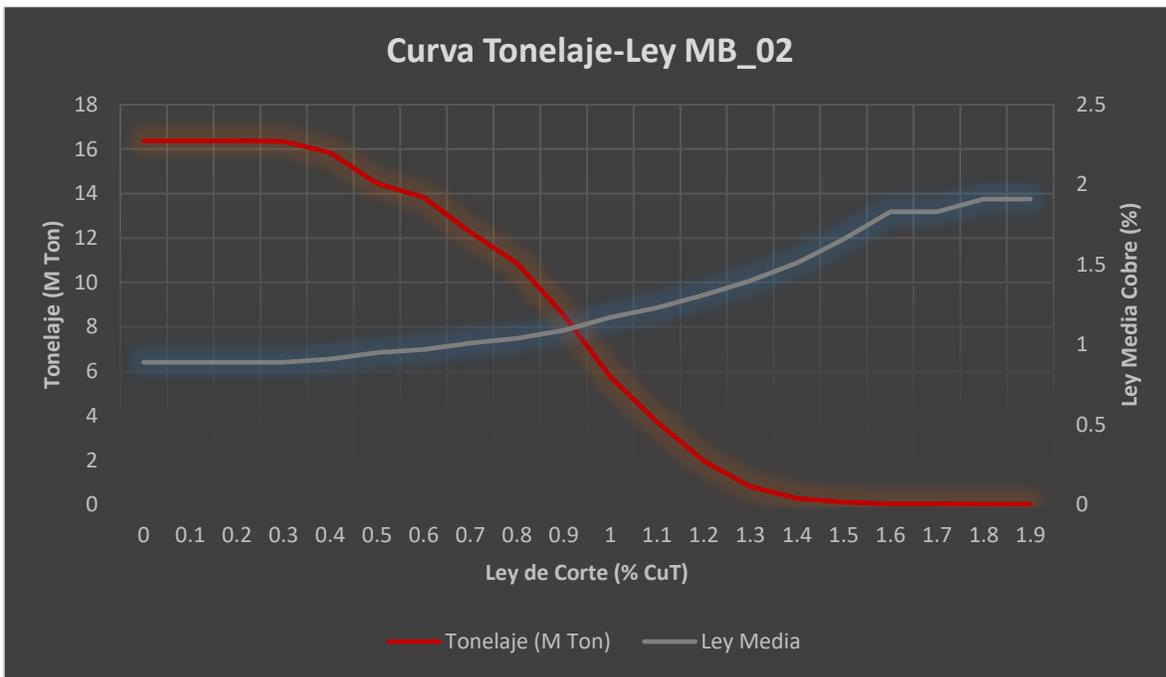


Gráfica 25 Curva Tonelaje Ley de Pit Final.

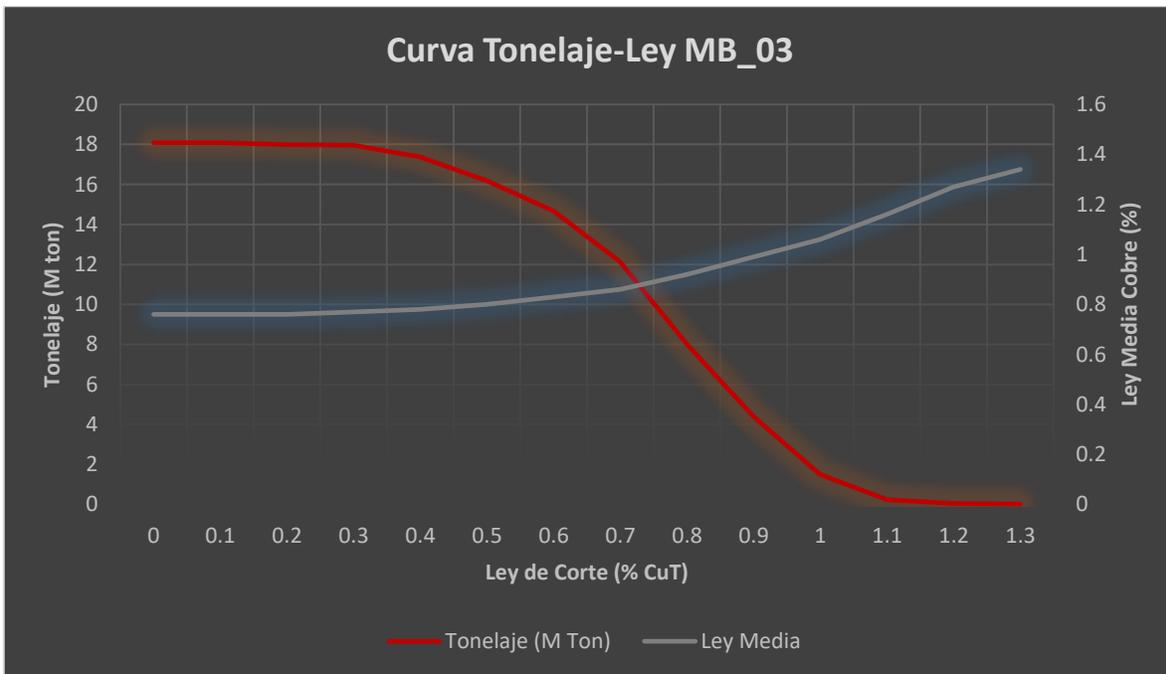
9.2.- Anexo B: Curvas Tonelaje Ley de Macro Bloques



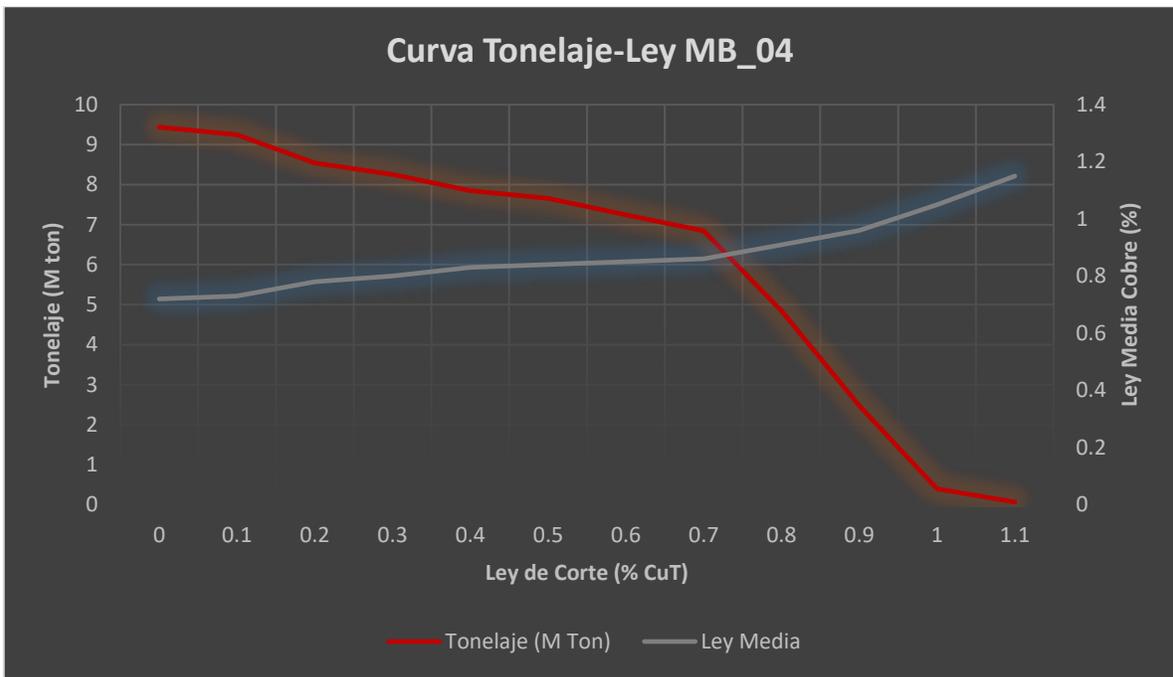
Gráfica 26 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 1.



Gráfica 27 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 2.



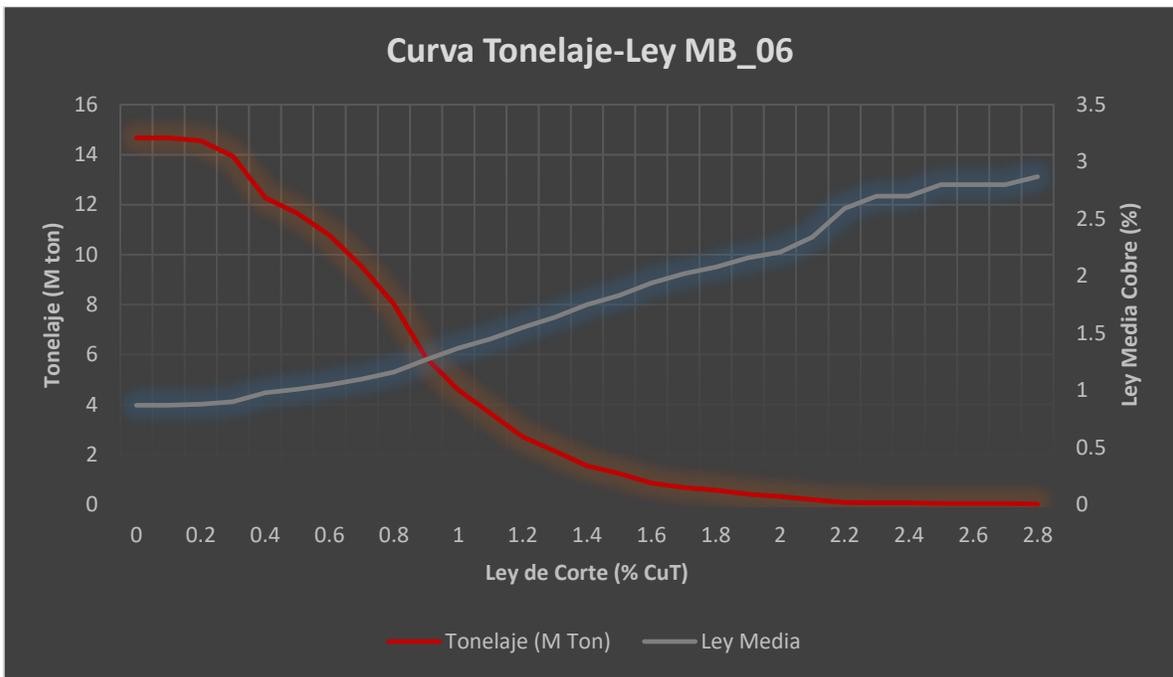
Gráfica 28 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 3.



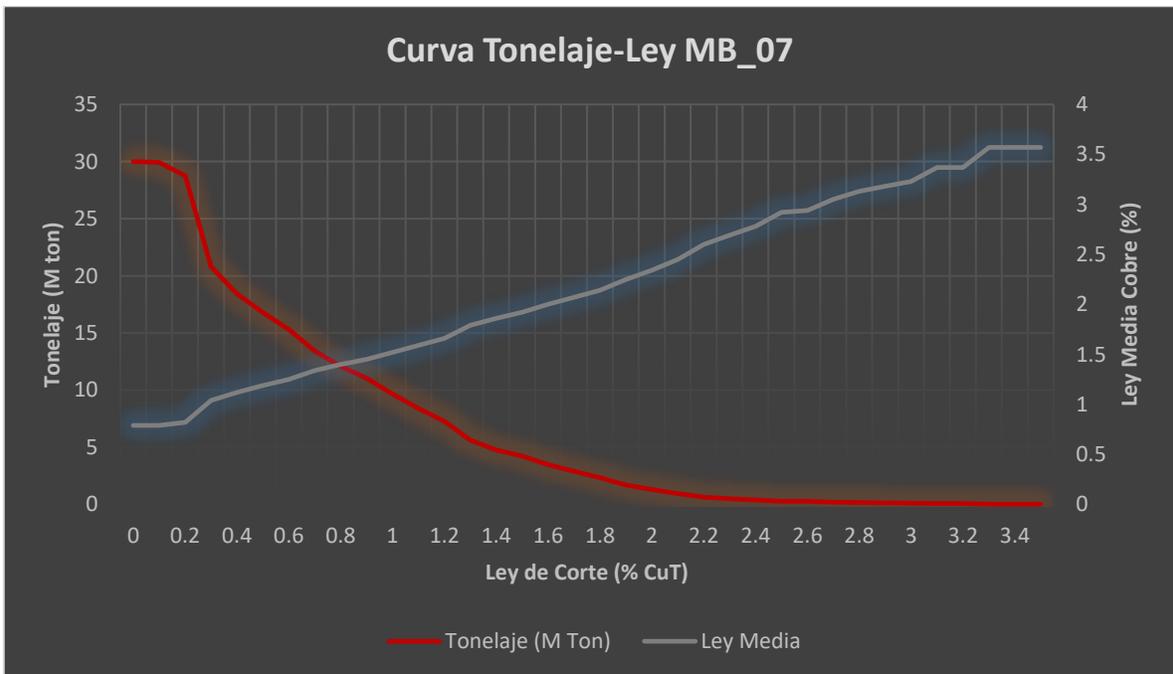
Gráfica 29 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 4.



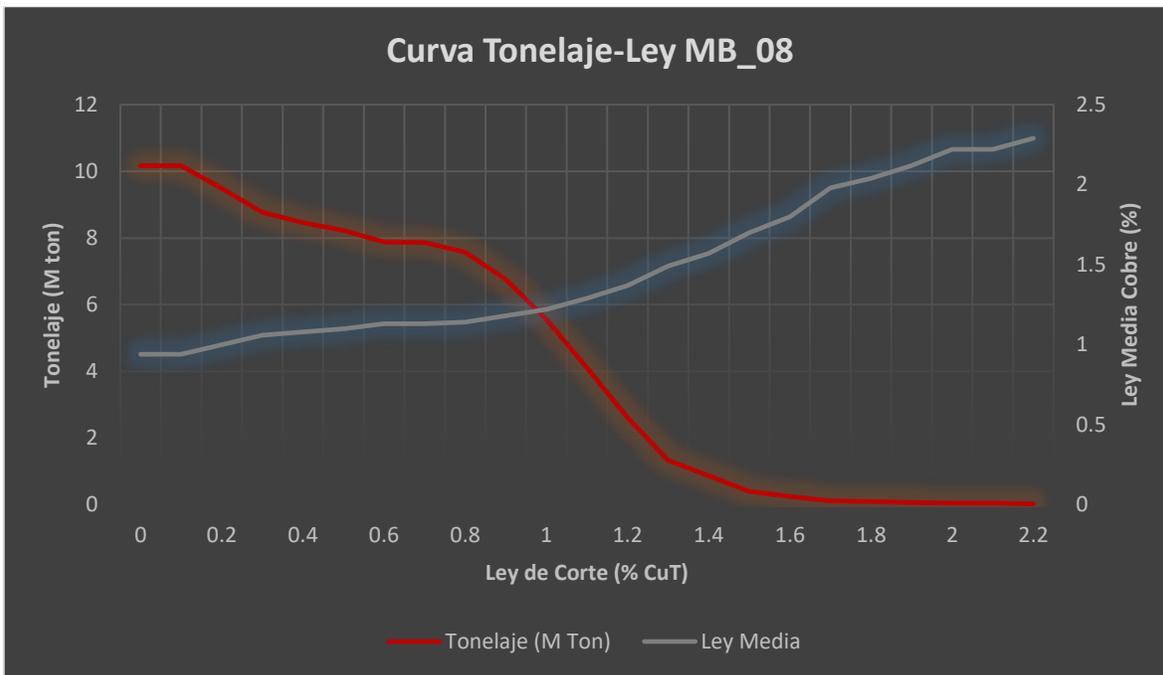
Gráfica 30 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 5.



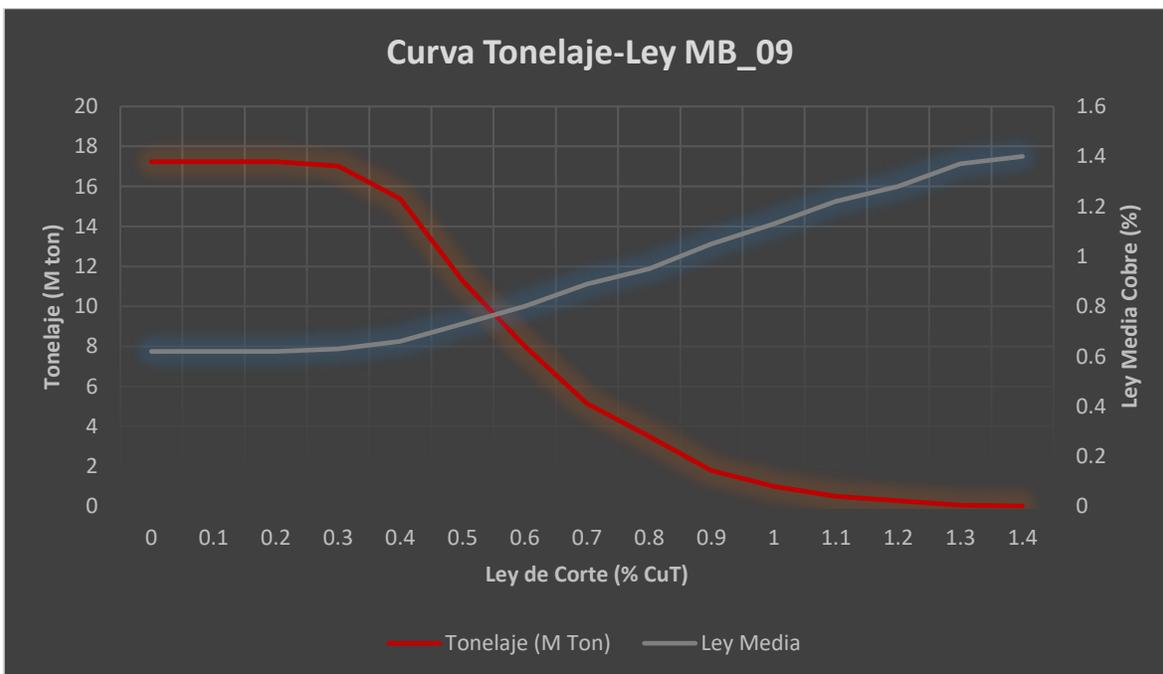
Gráfica 31 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 6.



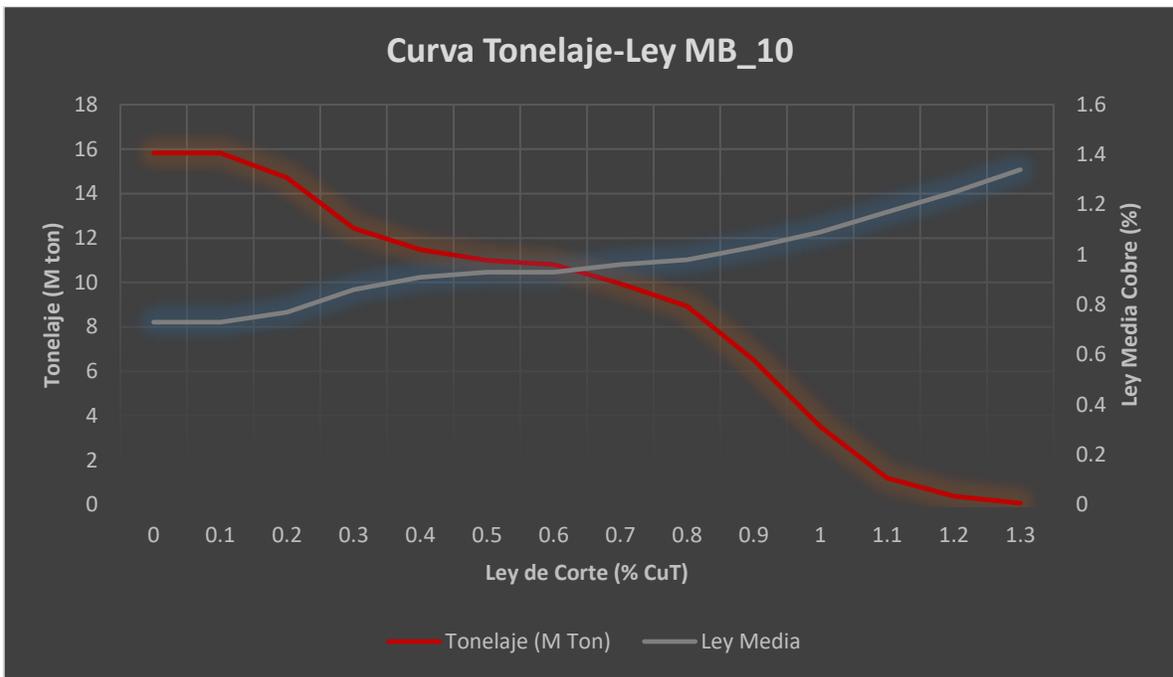
Gráfica 32 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 7.



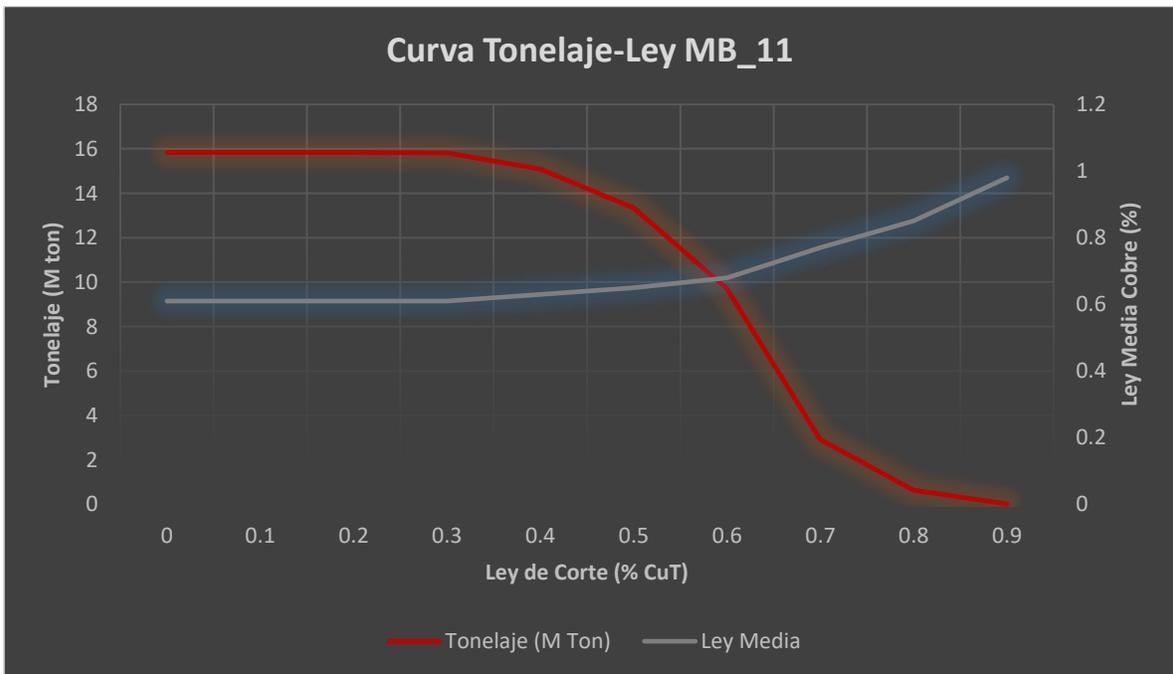
Gráfica 33 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 8.



Gráfica 34 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 9.



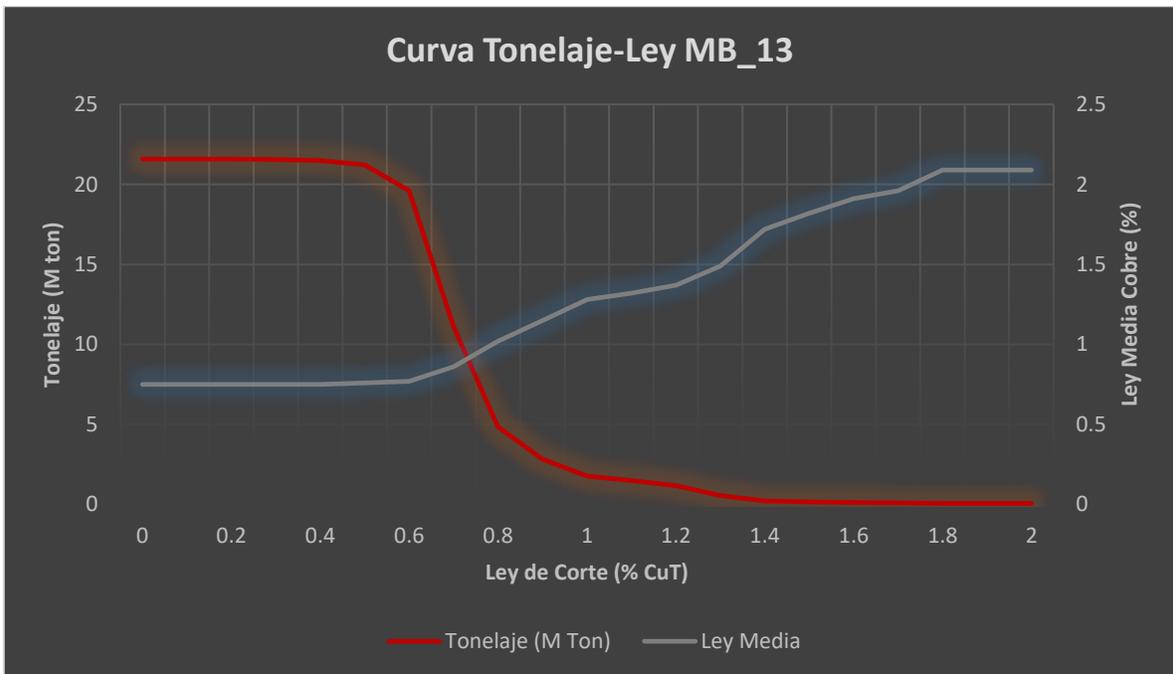
Gráfica 35 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 10.



Gráfica 36 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 11.



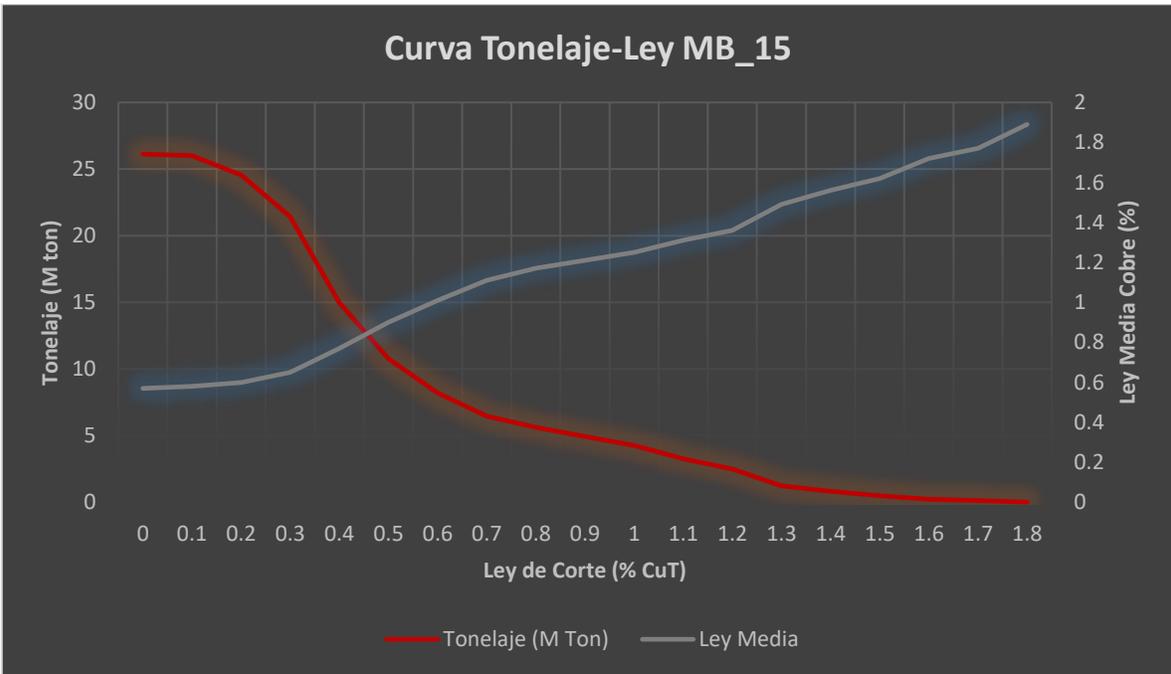
Gráfica 37 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 12.



Gráfica 38 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 13.



Gráfica 39 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 14.



Gráfica 40 Curva Tonelaje Ley de macro bloque 15.

9.3.- Anexo C: Valorización de Macro Bloques desglosado por UBE

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_1_A0	12904742	0.0747	1108000	0.66
MB_1_A1	14121875	0.0747	1108000	0.69
MB_1_A2	14866987	0.0747	1108000	0.70
MB_1_A3	15219391	0.1635	1108000	0.71
MB_1_A4	16120445	0.1635	1108000	0.73
MB_1_A5	15999469	0.1635	1108000	0.73
MB_1_A6	15418712	0.1635	1108000	0.71
MB_1_A7	11218981	0.3732	1048578	0.64
MB_1_A8	10199295	0.3832	1028800	0.62
MB_1_A9	8984647	0.3810	1032954	0.60
MB_1_A10	11429684	0.3796	1035839	0.65
MB_1_A11	13533678	0.3784	1036317	0.69
MB_1_A12	5823600	0.4381	886217	0.55
MB_1_A13	4973829	0.4595	844705	0.54
MB_1_A14	1559964	0.4592	845153	0.44

Tabla 12 Valorización de MB_1 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_2_A0	27730650	0.0747	997200	1.03
MB_2_A1	28035903	0.0747	997200	1.03
MB_2_A2	27953341	0.0747	997200	1.03
MB_2_A3	27437287	0.1637	995840	1.02
MB_2_A4	26374469	0.1639	994480	1.00
MB_2_A5	26761547	0.1644	991760	1.01
MB_2_A6	27964457	0.1651	987680	1.04
MB_2_A7	27786828	0.3559	982240	1.04
MB_2_A8	26367312	0.3574	978160	1.01
MB_2_A9	25244599	0.3589	974080	0.98
MB_2_A10	22042129	0.3600	971360	0.91
MB_2_A11	18987119	0.3642	938907	0.85
MB_2_A12	11725864	0.3928	792619	0.74
MB_2_A13	9969245	0.4129	740536	0.70
MB_2_A14	7147923	0.4146	643173	0.65
MB_2_A15	5591319	0.4158	622373	0.60
MB_2_A16	4024474	0.4200	504268	0.58
MB_2_A17	2702786	0.4212	446933	0.53
MB_2_A18	1281004	0.4219	297520	0.50
MB_2_A19	743859	0.4265	239040	0.47
MB_2_A20	117057	0.4353	143741	0.42

MB_2_A21	134051	0.4484	86582	0.44
MB_2_A22	24988	0.4427	35067	0.42

Tabla 13 Valorización de MB_2 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_3_A0	21201780	0.0747	1551200	0.71
MB_3_A1	21886485	0.0747	1551200	0.72
MB_3_A2	22773215	0.0747	1551200	0.73
MB_3_A3	23440786	0.1635	1551200	0.74
MB_3_A4	24606799	0.1635	1551200	0.76
MB_3_A5	27125755	0.1635	1551200	0.79
MB_3_A6	28465089	0.3503	1551200	0.81
MB_3_A7	29130875	0.3503	1551200	0.82
MB_3_A8	28097297	0.3503	1551200	0.81
MB_3_A9	17827385	0.3503	1019360	0.79
MB_3_A10	17085588	0.3503	842080	0.86
MB_3_A11	14651920	0.3503	731280	0.85
MB_3_A12	7519632	0.3768	537410	0.71
MB_3_A13	3261930	0.4137	362960	0.63
MB_3_A14	1368905	0.3914	262180	0.54
MB_3_A15	338363	0.3625	194160	0.46

Tabla 14 Valorización de MB_3 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_4_A0	21945441	0.0747	997200	0.90
MB_4_A1	20884428	0.0747	997200	0.87
MB_4_A2	20096622	0.0747	997200	0.85
MB_4_A3	18973319	0.1637	995840	0.83
MB_4_A4	18433106	0.1647	990400	0.82
MB_4_A5	16508532	0.1651	987680	0.77
MB_4_A6	13127661	0.3554	983600	0.70
MB_4_A7	6807363	0.3579	976800	0.55
MB_4_A8	3612066	0.3605	970000	0.48

Tabla 15 Valorización de MB_4 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_5_A0	19146506	0.0747	997200	0.83
MB_5_A1	19551775	0.0747	997200	0.84
MB_5_A2	19881303	0.0747	997200	0.85
MB_5_A3	20393008	0.1635	997200	0.86
MB_5_A4	22272388	0.1635	997200	0.90
MB_5_A5	21421580	0.1635	997200	0.88
MB_5_A6	18843645	0.3503	997200	0.83

MB_5_A7	17645448	0.3503	997200	0.80
MB_5_A8	18362128	0.3503	997200	0.82

Tabla 16 Valorización de MB_5 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_6_A0	20382149	0.0747	1196640	0.78
MB_6_A1	18095099	0.0747	1196640	0.74
MB_6_A2	20268591	0.0747	1196640	0.78
MB_6_A3	24847908	0.1635	1196640	0.87
MB_6_A4	29207243	0.1635	1196640	0.95
MB_6_A5	28896616	0.1635	1196640	0.94
MB_6_A6	30706808	0.3503	1196640	0.98
MB_6_A7	32216548	0.3503	1196640	1.01
MB_6_A8	32472601	0.3503	1196640	1.01
MB_6_A9	25602672	0.3503	842080	1.08
MB_6_A10	20858954	0.3503	753440	1.02
MB_6_A11	13986184	0.3503	664800	0.87
MB_6_A12	6700672	0.3503	531840	0.69
MB_6_A13	2482432	0.3503	398880	0.54
MB_6_A14	721119	0.3503	310240	0.46

Tabla 17 Valorización de MB_6 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_7_A0	11234450	0.0753	1100320	0.63
MB_7_A1	12536652	0.0751	1102240	0.66
MB_7_A2	21497353	0.0749	1105120	0.84
MB_7_A3	28369164	0.0749	1105120	0.98
MB_7_A4	32063670	0.0748	1107040	1.05
MB_7_A5	34072144	0.1636	1107040	1.09
MB_7_A6	37716216	0.1635	1108000	1.17
MB_7_A7	40967262	0.1635	1108000	1.23
MB_7_A8	42836965	0.1635	1108000	1.27
MB_7_A9	41844782	0.1635	1108000	1.25
MB_7_A10	35603127	0.1635	1108000	1.12
MB_7_A11	31275306	0.3503	1108000	1.04
MB_7_A12	27707071	0.3503	1108000	0.96
MB_7_A13	26059263	0.3503	1108000	0.93
MB_7_A14	22701679	0.3503	1108000	0.86
MB_7_A15	21158765	0.3503	1108000	0.83
MB_7_A16	20717281	0.3503	1108000	0.82
MB_7_A17	20694743	0.3503	1108000	0.82
MB_7_A18	19789883	0.3503	1063680	0.82

MB_7_A19	8211517	0.3503	1019360	0.58
MB_7_A20	6027190	0.3503	952880	0.54
MB_7_A21	3109551	0.3503	886400	0.48
MB_7_A22	1664223	0.3503	819920	0.45

Tabla 18 Valorización de MB_7 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_8_A0	27478161	0.0748	995840	1.02
MB_8_A1	29445334	0.0748	995840	1.06
MB_8_A2	28289501	0.0749	994480	1.04
MB_8_A3	28322444	0.1642	993120	1.04
MB_8_A4	29512099	0.1647	990400	1.07
MB_8_A5	28980969	0.1654	986320	1.05
MB_8_A6	27136681	0.3549	984960	1.01
MB_8_A7	25078481	0.3554	983600	0.97
MB_8_A8	21520601	0.3569	979520	0.88
MB_8_A9	1523101	0.3652	425520	0.47
MB_8_A10	557682	0.3686	316080	0.43

Tabla 19 Valorización de MB_8 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_9_A0	11703510	0.0747	1218800	0.62
MB_9_A1	12201624	0.0747	1218800	0.63
MB_9_A2	12779705	0.0747	1218800	0.64
MB_9_A3	13975431	0.1635	1218800	0.66
MB_9_A4	15300898	0.1635	1218800	0.68
MB_9_A5	14652499	0.1635	1218800	0.67
MB_9_A6	15024913	0.3503	1218800	0.68
MB_9_A7	14364309	0.3503	1218800	0.67
MB_9_A8	15492905	0.3503	1218800	0.69
MB_9_A9	8091065	0.3503	819920	0.62
MB_9_A10	7845859	0.3503	775600	0.63
MB_9_A11	7726802	0.3503	686960	0.66
MB_9_A12	7292638	0.3503	664800	0.65
MB_9_A13	5432393	0.3503	576160	0.61
MB_9_A14	4291045	0.3503	554000	0.58
MB_9_A15	2433270	0.3503	465360	0.52
MB_9_A16	1829787	0.3503	443200	0.50
MB_9_A17	689182	0.3503	332400	0.45
MB_9_A18	303052	0.3503	332400	0.42

Tabla 20 Valorización de MB_9 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_10_A0	22966671	0.0747	997200	0.92
MB_10_A1	22926941	0.0749	994880	0.92
MB_10_A2	21975143	0.0749	994480	0.90
MB_10_A3	20618548	0.1643	992160	0.87
MB_10_A4	19983601	0.1654	986320	0.85
MB_10_A5	19523840	0.1654	986320	0.84
MB_10_A6	18476856	0.3554	983600	0.82
MB_10_A7	17614884	0.3554	983600	0.80
MB_10_A8	15143847	0.3564	980880	0.74
MB_10_A9	13643510	0.3569	979520	0.71
MB_10_A10	13542653	0.3576	956000	0.71
MB_10_A11	11936198	0.3585	910320	0.69
MB_10_A12	7533635	0.3673	824976	0.60
MB_10_A13	4386681	0.3867	729680	0.54
MB_10_A14	2763044	0.3852	650240	0.50
MB_10_A15	811688	0.3835	550004	0.44

Tabla 21 Valorización de MB_10 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_11_A0	10837547	0.0747	1108000	0.62
MB_11_A1	10887501	0.0747	1108000	0.62
MB_11_A2	11020162	0.0747	1108000	0.63
MB_11_A3	10792209	0.1635	1108000	0.62
MB_11_A4	11329466	0.1635	1108000	0.63
MB_11_A5	11460714	0.1635	1108000	0.63
MB_11_A6	11996595	0.3503	1108000	0.65
MB_11_A7	11724911	0.3503	1108000	0.64
MB_11_A8	11437614	0.3503	1108000	0.63
MB_11_A9	8263476	0.3503	908560	0.61
MB_11_A10	7358066	0.3503	819920	0.60
MB_11_A11	6432020	0.3503	775600	0.59
MB_11_A12	4956974	0.3521	661867	0.57
MB_11_A13	5748995	0.3503	576160	0.63
MB_11_A14	4574112	0.3503	509680	0.60
MB_11_A15	3624865	0.3503	421040	0.60
MB_11_A16	2640061	0.3503	354560	0.57
MB_11_A17	1923977	0.3503	288080	0.55
MB_11_A18	1451347	0.3503	243760	0.54
MB_11_A19	173370	0.3503	177280	0.43
MB_11_A20	23357	0.3503	88640	0.41

MB_11_A21	84517	0.3503	44320	0.45
-----------	-------	--------	-------	------

Tabla 22 Valorización de MB_11 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_12_A0	39812386	0.0755	1690400	0.93
MB_12_A1	37654088	0.0752	1695520	0.90
MB_12_A2	35236250	0.0751	1698880	0.87
MB_12_A3	34642618	0.0751	1698480	0.86
MB_12_A4	34067063	0.0752	1695200	0.85
MB_12_A5	32502299	0.1646	1695120	0.83
MB_12_A6	31641456	0.1648	1693200	0.82
MB_12_A7	32465353	0.1651	1690480	0.83
MB_12_A8	31383549	0.1655	1686400	0.82
MB_12_A9	29901037	0.1655	1685904	0.80
MB_12_A10	27871367	0.1662	1680880	0.77
MB_12_A11	27936544	0.3578	1673120	0.77
MB_12_A12	25785273	0.3630	1648509	0.75
MB_12_A13	28235999	0.3868	1563840	0.81
MB_12_A14	28138629	0.3892	1550605	0.81
MB_12_A15	32686996	0.3960	1524836	0.89
MB_12_A16	25913301	0.4159	1446372	0.83
MB_12_A17	19195885	0.4303	1401632	0.73
MB_12_A18	16665638	0.4286	1388253	0.70
MB_12_A19	15066777	0.4282	1371193	0.67
MB_12_A20	13720391	0.4273	1300957	0.66
MB_12_A21	9737937	0.4255	1233120	0.60
MB_12_A22	8131928	0.4247	1161680	0.58
MB_12_A23	6512155	0.4232	1073360	0.56
MB_12_A24	5238955	0.4233	943391	0.55
MB_12_A25	5769594	0.4250	829422	0.57
MB_12_A26	5418157	0.4268	697826	0.59
MB_12_A27	5201952	0.4308	527413	0.62
MB_12_A28	3964178	0.4271	385119	0.63
MB_12_A29	3719826	0.4266	293565	0.67
MB_12_A30	1913800	0.4227	222160	0.59
MB_12_A31	745307	0.4258	146800	0.51
MB_12_A32	358248	0.4095	76263	0.51
MB_12_A33	629474	0.3982	38987	0.76
MB_12_A34	404578	0.3982	19493	0.87

Tabla 23 Valorización de MB_12 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
----	-----------	----------	----------	--------

MB_13_A0	15832701	0.0747	1063680	0.74
MB_13_A1	15597935	0.0747	1063680	0.73
MB_13_A2	15378537	0.0747	1063680	0.73
MB_13_A3	15163008	0.0747	1063680	0.72
MB_13_A4	15188341	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A5	15000481	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A6	14895139	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A7	14187689	0.1635	1063680	0.70
MB_13_A8	13660242	0.1635	1063680	0.69
MB_13_A9	12715872	0.3507	1062613	0.67
MB_13_A10	12597286	0.3526	1058400	0.67
MB_13_A11	12893782	0.3514	1060651	0.68
MB_13_A12	12292364	0.3588	1040508	0.67
MB_13_A13	14585283	0.3789	996581	0.74
MB_13_A14	15031870	0.3793	994311	0.75
MB_13_A15	14838267	0.3868	936569	0.77
MB_13_A16	13760131	0.3848	858840	0.78
MB_13_A17	12483319	0.3850	817124	0.75
MB_13_A18	11719877	0.3844	695096	0.80
MB_13_A19	10251662	0.3853	591250	0.81
MB_13_A20	11022946	0.3913	521523	0.89
MB_13_A21	11139662	0.3993	410724	1.02
MB_13_A22	12079203	0.4004	330779	1.23
MB_13_A23	12583712	0.4034	289843	1.37
MB_13_A24	8157926	0.4070	191479	1.35
MB_13_A25	2643564	0.4371	106585	0.96
MB_13_A26	889810	0.4588	50761	0.80

Tabla 24 Valorización de MB_13 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_14_A0	1920695	0.0747	1063680	0.44
MB_14_A1	2253725	0.0747	1063680	0.45
MB_14_A2	2514818	0.0747	1063680	0.46
MB_14_A3	2757666	0.0747	1063680	0.46
MB_14_A4	3362041	0.0747	1063680	0.47
MB_14_A5	4306128	0.0747	1063680	0.49
MB_14_A6	4715644	0.1635	1063680	0.50
MB_14_A7	5223125	0.1635	1063680	0.51
MB_14_A8	5433445	0.1635	1063680	0.52
MB_14_A9	5551157	0.1635	1063680	0.52
MB_14_A10	5946433	0.1635	1063680	0.53
MB_14_A11	6155632	0.1635	1063680	0.53

MB_14_A12	6894106	0.3503	1063680	0.55
MB_14_A13	10073353	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A14	10290498	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A15	10522250	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A16	9465014	0.3503	1063680	0.60
MB_14_A17	9123321	0.3503	1063680	0.60
MB_14_A18	8822558	0.3503	1063680	0.59
MB_14_A19	3108134	0.3503	1063680	0.47
MB_14_A20	3453115	0.3503	1063680	0.48
MB_14_A21	3355365	0.3511	1039440	0.48
MB_14_A22	2505974	0.3519	993040	0.46
MB_14_A23	1828885	0.3544	920800	0.45
MB_14_A24	1231958	0.3538	834480	0.44
MB_14_A25	737865	0.3534	703360	0.43
MB_14_A26	604784	0.3551	634560	0.43

Tabla 25 Valorización de MB_14 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_15_A0	26431609	0.0761	979520	1.00
MB_15_A1	25299932	0.0764	976800	0.98
MB_15_A2	24259735	0.0768	971360	0.95
MB_15_A3	22949668	0.1689	965920	0.93
MB_15_A4	22172455	0.1692	964560	0.91
MB_15_A5	22625237	0.1701	959120	0.92
MB_15_A6	21492009	0.1711	953680	0.90
MB_15_A7	12124426	0.3813	920138	0.69
MB_15_A8	8662136	0.3879	907627	0.61
MB_15_A9	8121562	0.3877	906963	0.60
MB_15_A10	7423914	0.3842	913174	0.58
MB_15_A11	5969776	0.3829	914899	0.55
MB_15_A12	1784669	0.3847	910843	0.45
MB_15_A13	5370069	0.3850	910313	0.53
MB_15_A14	4929366	0.3849	910520	0.52
MB_15_A15	3900633	0.3849	910520	0.50
MB_15_A16	3761547	0.3849	910520	0.49
MB_15_A17	2720545	0.3845	911265	0.47
MB_15_A18	490832	0.3839	912480	0.41
MB_15_A19	505753	0.3839	912480	0.41
MB_15_A20	490133	0.3837	912752	0.41
MB_15_A21	1159279	0.3824	915349	0.43

Tabla 26 Valorización de MB_15 considerando Costo de Operación como una variable fija.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_1_A0	12904742	0.0747	1108000	0.66
MB_1_A1	14121875	0.0747	1108000	0.69
MB_1_A2	14866987	0.0747	1108000	0.70
MB_1_A3	15219391	0.1635	1108000	0.71
MB_1_A4	16120445	0.1635	1108000	0.73
MB_1_A5	15999469	0.1635	1108000	0.73
MB_1_A6	15418712	0.1635	1108000	0.71
MB_1_A7	11218981	0.3732	1048578	0.64
MB_1_A8	10199295	0.3832	1028800	0.62
MB_1_A9	8984647	0.3810	1032954	0.60
MB_1_A10	11429684	0.3796	1035839	0.65
MB_1_A11	13533678	0.3784	1036317	0.69
MB_1_A12	5823600	0.4381	886217	0.55
MB_1_A13	4973829	0.4595	844705	0.54
MB_1_A14	1559964	0.4592	845153	0.44
MB_1_A15	1932182	0.4585	846613	0.40
MB_1_A16	139334	0.4585	846613	0.35

Tabla 27 Valorización de MB_1 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_2_A0	27730650	0.0747	997200	1.03
MB_2_A1	28035903	0.0747	997200	1.03
MB_2_A2	27953341	0.0747	997200	1.03
MB_2_A3	27437287	0.1637	995840	1.02
MB_2_A4	26374469	0.1639	994480	1.00
MB_2_A5	26761547	0.1644	991760	1.01
MB_2_A6	27964457	0.1651	987680	1.04
MB_2_A7	27786828	0.3559	982240	1.04
MB_2_A8	26367312	0.3574	978160	1.01
MB_2_A9	25244599	0.3589	974080	0.98
MB_2_A10	22042129	0.3600	971360	0.91
MB_2_A11	19039281	0.3642	938907	0.85
MB_2_A12	11946036	0.3928	792619	0.74
MB_2_A13	10216091	0.4129	740536	0.70
MB_2_A14	7540973	0.4146	643173	0.65
MB_2_A15	6006234	0.4158	622373	0.60
MB_2_A16	4528742	0.4200	504268	0.58
MB_2_A17	3224208	0.4212	446933	0.53
MB_2_A18	1760342	0.4219	297520	0.50
MB_2_A19	1168819	0.4265	239040	0.47
MB_2_A20	412525	0.4353	143741	0.42

MB_2_A21	326456	0.4484	86582	0.44
MB_2_A22	108758	0.4427	35067	0.42

Tabla 28 Valorización de MB_2 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_3_A0	21201780	0.0747	1551200	0.71
MB_3_A1	21886485	0.0747	1551200	0.72
MB_3_A2	22773215	0.0747	1551200	0.73
MB_3_A3	23440786	0.1635	1551200	0.74
MB_3_A4	24606799	0.1635	1551200	0.76
MB_3_A5	27125755	0.1635	1551200	0.79
MB_3_A6	28465089	0.3503	1551200	0.81
MB_3_A7	29130875	0.3503	1551200	0.82
MB_3_A8	28097297	0.3503	1551200	0.81
MB_3_A9	18701122	0.3503	1019360	0.79
MB_3_A10	18047965	0.3503	842080	0.86
MB_3_A11	15618255	0.3503	731280	0.85
MB_3_A12	8364132	0.3768	537410	0.71
MB_3_A13	3923035	0.4137	362960	0.63
MB_3_A14	1902629	0.3914	262180	0.54
MB_3_A15	761354	0.3625	194160	0.46
MB_3_A16	231132	0.3503	110800	0.40
MB_3_A17	208678	0.3589	43280	0.46
MB_3_A18	333339	0.3675	21120	0.70

Tabla 29 Valorización de MB_3 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_4_A0	21945441	0.0747	997200	0.90
MB_4_A1	20884428	0.0747	997200	0.87
MB_4_A2	20096622	0.0747	997200	0.85
MB_4_A3	18973319	0.1637	995840	0.83
MB_4_A4	18433106	0.1647	990400	0.82
MB_4_A5	16508532	0.1651	987680	0.77
MB_4_A6	13127661	0.3554	983600	0.70
MB_4_A7	6807363	0.3579	976800	0.55
MB_4_A8	3612066	0.3605	970000	0.48

Tabla 30 Valorización de MB_4 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_5_A0	19146506	0.0747	997200	0.83
MB_5_A1	19551775	0.0747	997200	0.84
MB_5_A2	19881303	0.0747	997200	0.85
MB_5_A3	20393008	0.1635	997200	0.86

MB_5_A4	22272388	0.1635	997200	0.90
MB_5_A5	21421580	0.1635	997200	0.88
MB_5_A6	18843645	0.3503	997200	0.83
MB_5_A7	17645448	0.3503	997200	0.80
MB_5_A8	18362128	0.3503	997200	0.82

Tabla 31 Valorización de MB_5 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_6_A0	20382149	0.0747	1196640	0.78
MB_6_A1	18095099	0.0747	1196640	0.74
MB_6_A2	20268591	0.0747	1196640	0.78
MB_6_A3	24847908	0.1635	1196640	0.87
MB_6_A4	29207243	0.1635	1196640	0.95
MB_6_A5	28896616	0.1635	1196640	0.94
MB_6_A6	30706808	0.3503	1196640	0.98
MB_6_A7	32216548	0.3503	1196640	1.01
MB_6_A8	32472601	0.3503	1196640	1.01
MB_6_A9	26226435	0.3503	842080	1.08
MB_6_A10	21556584	0.3503	753440	1.02
MB_6_A11	14724851	0.3503	664800	0.87
MB_6_A12	7439339	0.3503	531840	0.69
MB_6_A13	3147231	0.3503	398880	0.54
MB_6_A14	1295637	0.3503	310240	0.46
MB_6_A15	144169	0.3503	199440	0.37

Tabla 32 Valorización de MB_6 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_7_A0	11234450	0.0753	1100320	0.63
MB_7_A1	12536652	0.0751	1102240	0.66
MB_7_A2	21497353	0.0749	1105120	0.84
MB_7_A3	28369164	0.0749	1105120	0.98
MB_7_A4	32063670	0.0748	1107040	1.05
MB_7_A5	34072144	0.1636	1107040	1.09
MB_7_A6	37716216	0.1635	1108000	1.17
MB_7_A7	40967262	0.1635	1108000	1.23
MB_7_A8	42836965	0.1635	1108000	1.27
MB_7_A9	41844782	0.1635	1108000	1.25
MB_7_A10	35603127	0.1635	1108000	1.12
MB_7_A11	31275306	0.3503	1108000	1.04
MB_7_A12	27707071	0.3503	1108000	0.96
MB_7_A13	26059263	0.3503	1108000	0.93
MB_7_A14	22701679	0.3503	1108000	0.86

MB_7_A15	21158765	0.3503	1108000	0.83
MB_7_A16	20717281	0.3503	1108000	0.82
MB_7_A17	20694743	0.3503	1108000	0.82
MB_7_A18	19896251	0.3503	1063680	0.82
MB_7_A19	8415389	0.3503	1019360	0.58
MB_7_A20	6360698	0.3503	952880	0.54
MB_7_A21	3552751	0.3503	886400	0.48
MB_7_A22	2197171	0.3503	819920	0.45
MB_7_A23	471424	0.3503	775600	0.40

Tabla 33 Valorización de MB_7 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_8_A0	27478161	0.0748	995840	1.02
MB_8_A1	29445334	0.0748	995840	1.06
MB_8_A2	28289501	0.0749	994480	1.04
MB_8_A3	28322444	0.1642	993120	1.04
MB_8_A4	29512099	0.1647	990400	1.07
MB_8_A5	28980969	0.1654	986320	1.05
MB_8_A6	27136681	0.3549	984960	1.01
MB_8_A7	25078481	0.3554	983600	0.97
MB_8_A8	21520601	0.3569	979520	0.88
MB_8_A9	2114101	0.3652	425520	0.47
MB_8_A10	1084482	0.3686	316080	0.43

Tabla 34 Valorización de MB_8 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_9_A0	11703510	0.0747	1218800	0.62
MB_9_A1	12201624	0.0747	1218800	0.63
MB_9_A2	12779705	0.0747	1218800	0.64
MB_9_A3	13975431	0.1635	1218800	0.66
MB_9_A4	15300898	0.1635	1218800	0.68
MB_9_A5	14652499	0.1635	1218800	0.67
MB_9_A6	15024913	0.3503	1218800	0.68
MB_9_A7	14364309	0.3503	1218800	0.67
MB_9_A8	15492905	0.3503	1218800	0.69
MB_9_A9	8761908	0.3503	819920	0.62
MB_9_A10	8550950	0.3503	775600	0.63
MB_9_A11	8476213	0.3503	686960	0.66
MB_9_A12	8048093	0.3503	664800	0.65
MB_9_A13	6191877	0.3503	576160	0.61
MB_9_A14	5046499	0.3503	554000	0.58
MB_9_A15	3152462	0.3503	465360	0.52

MB_9_A16	2534878	0.3503	443200	0.50
MB_9_A17	1293545	0.3503	332400	0.45
MB_9_A18	907416	0.3503	332400	0.42

Tabla 35 Valorización de MB_9 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_10_A0	22966671	0.0747	997200	0.92
MB_10_A1	22926941	0.0749	994880	0.92
MB_10_A2	21975143	0.0749	994480	0.90
MB_10_A3	20618548	0.1643	992160	0.87
MB_10_A4	19983601	0.1654	986320	0.85
MB_10_A5	19523840	0.1654	986320	0.84
MB_10_A6	18476856	0.3554	983600	0.82
MB_10_A7	17614884	0.3554	983600	0.80
MB_10_A8	15143847	0.3564	980880	0.74
MB_10_A9	13643510	0.3569	979520	0.71
MB_10_A10	13595764	0.3576	956000	0.71
MB_10_A11	12087918	0.3585	910320	0.69
MB_10_A12	7808627	0.3673	824976	0.60
MB_10_A13	4751521	0.3867	729680	0.54
MB_10_A14	3232662	0.3852	650240	0.50
MB_10_A15	1361692	0.3835	550004	0.44

Tabla 36 Valorización de MB_10 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_11_A0	10837547	0.0747	1108000	0.62
MB_11_A1	10887501	0.0747	1108000	0.62
MB_11_A2	11020162	0.0747	1108000	0.63
MB_11_A3	10792209	0.1635	1108000	0.62
MB_11_A4	11329466	0.1635	1108000	0.63
MB_11_A5	11460714	0.1635	1108000	0.63
MB_11_A6	11996595	0.3503	1108000	0.65
MB_11_A7	11724911	0.3503	1108000	0.64
MB_11_A8	11437614	0.3503	1108000	0.63
MB_11_A9	8672328	0.3503	908560	0.61
MB_11_A10	7891014	0.3503	819920	0.60
MB_11_A11	7013720	0.3503	775600	0.59
MB_11_A12	5618840	0.3521	661867	0.57
MB_11_A13	6440387	0.3503	576160	0.63
MB_11_A14	5262180	0.3503	509680	0.60
MB_11_A15	4277476	0.3503	421040	0.60
MB_11_A16	3242813	0.3503	354560	0.57

MB_11_A17	2456925	0.3503	288080	0.55
MB_11_A18	1926678	0.3503	243760	0.54
MB_11_A19	545658	0.3503	177280	0.43
MB_11_A20	227229	0.3503	88640	0.41
MB_11_A21	190885	0.3503	44320	0.45

Tabla 37 Valorización de MB_11 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_12_A0	39812386	0.0755	1690400	0.93
MB_12_A1	37654088	0.0752	1695520	0.90
MB_12_A2	35236250	0.0751	1698880	0.87
MB_12_A3	34642618	0.0751	1698480	0.86
MB_12_A4	34067063	0.0752	1695200	0.85
MB_12_A5	32502299	0.1646	1695120	0.83
MB_12_A6	31641456	0.1648	1693200	0.82
MB_12_A7	32465353	0.1651	1690480	0.83
MB_12_A8	31383549	0.1655	1686400	0.82
MB_12_A9	29901037	0.1655	1685904	0.80
MB_12_A10	27871367	0.1662	1680880	0.77
MB_12_A11	27936544	0.3578	1673120	0.77
MB_12_A12	25785273	0.3630	1648509	0.75
MB_12_A13	28235999	0.3868	1563840	0.81
MB_12_A14	28138629	0.3892	1550605	0.81
MB_12_A15	32686996	0.3960	1524836	0.89
MB_12_A16	25913301	0.4159	1446372	0.83
MB_12_A17	19195885	0.4303	1401632	0.73
MB_12_A18	16710711	0.4286	1388253	0.70
MB_12_A19	15155816	0.4282	1371193	0.67
MB_12_A20	13973824	0.4273	1300957	0.66
MB_12_A21	10138301	0.4255	1233120	0.60
MB_12_A22	8659964	0.4247	1161680	0.58
MB_12_A23	7174293	0.4232	1073360	0.56
MB_12_A24	6035323	0.4233	943391	0.55
MB_12_A25	6631332	0.4250	829422	0.57
MB_12_A26	6301768	0.4268	697826	0.59
MB_12_A27	6023894	0.4308	527413	0.62
MB_12_A28	4664395	0.4271	385119	0.63
MB_12_A29	4301236	0.4266	293565	0.67
MB_12_A30	2382644	0.4227	222160	0.59
MB_12_A31	1074177	0.4258	146800	0.51
MB_12_A32	539000	0.4095	76263	0.51
MB_12_A33	724409	0.3982	38987	0.76

MB_12_A34	452678	0.3982	19493	0.87
-----------	--------	--------	-------	------

Tabla 38 Valorización de MB_12 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_13_A0	15832701	0.0747	1063680	0.74
MB_13_A1	15597935	0.0747	1063680	0.73
MB_13_A2	15378537	0.0747	1063680	0.73
MB_13_A3	15163008	0.0747	1063680	0.72
MB_13_A4	15188341	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A5	15000481	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A6	14895139	0.1635	1063680	0.72
MB_13_A7	14187689	0.1635	1063680	0.70
MB_13_A8	13660242	0.1635	1063680	0.69
MB_13_A9	12715872	0.3507	1062613	0.67
MB_13_A10	12597286	0.3526	1058400	0.67
MB_13_A11	12893782	0.3514	1060651	0.68
MB_13_A12	12292364	0.3588	1040508	0.67
MB_13_A13	14585283	0.3789	996581	0.74
MB_13_A14	15031870	0.3793	994311	0.75
MB_13_A15	14935826	0.3868	936569	0.77
MB_13_A16	14028518	0.3848	858840	0.78
MB_13_A17	12823787	0.3850	817124	0.75
MB_13_A18	12226718	0.3844	695096	0.80
MB_13_A19	10836753	0.3853	591250	0.81
MB_13_A20	11620524	0.3913	521523	0.89
MB_13_A21	11717244	0.3993	410724	1.02
MB_13_A22	12613273	0.4004	330779	1.23
MB_13_A23	13081879	0.4034	289843	1.37
MB_13_A24	8536895	0.4070	191479	1.35
MB_13_A25	2876718	0.4371	106585	0.96
MB_13_A26	1008781	0.4588	50761	0.80

Tabla 39 Valorización de MB_13 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_14_A0	1920695	0.0747	1063680	0.44
MB_14_A1	2253725	0.0747	1063680	0.45
MB_14_A2	2514818	0.0747	1063680	0.46
MB_14_A3	2757666	0.0747	1063680	0.46
MB_14_A4	3362041	0.0747	1063680	0.47
MB_14_A5	4306128	0.0747	1063680	0.49
MB_14_A6	4715644	0.1635	1063680	0.50
MB_14_A7	5223125	0.1635	1063680	0.51

MB_14_A8	5433445	0.1635	1063680	0.52
MB_14_A9	5551157	0.1635	1063680	0.52
MB_14_A10	5946433	0.1635	1063680	0.53
MB_14_A11	6155632	0.1635	1063680	0.53
MB_14_A12	6894106	0.3503	1063680	0.55
MB_14_A13	10073353	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A14	10290498	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A15	10522250	0.3503	1063680	0.62
MB_14_A16	9465014	0.3503	1063680	0.60
MB_14_A17	9123321	0.3503	1063680	0.60
MB_14_A18	8822558	0.3503	1063680	0.59
MB_14_A19	3108134	0.3503	1063680	0.47
MB_14_A20	3453115	0.3503	1063680	0.48
MB_14_A21	3409502	0.3511	1039440	0.48
MB_14_A22	2661136	0.3519	993040	0.46
MB_14_A23	2116635	0.3544	920800	0.45
MB_14_A24	1666583	0.3538	834480	0.44
MB_14_A25	1323998	0.3534	703360	0.43
MB_14_A26	1232734	0.3551	634560	0.43
MB_14_A27	611969	0.3519	485440	0.38
MB_14_A28	321484	0.3546	372560	0.37
MB_14_A29	44046	0.3533	263840	0.35

Tabla 40 Valorización de MB_14 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

ID	BENEFICIO	MAX_RATE	TONELAJE	Ley Cu
MB_15_A0	26431609	0.0761	979520	1.00
MB_15_A1	25299932	0.0764	976800	0.98
MB_15_A2	24259735	0.0768	971360	0.95
MB_15_A3	22949668	0.1689	965920	0.93
MB_15_A4	22172455	0.1692	964560	0.91
MB_15_A5	22625237	0.1701	959120	0.92
MB_15_A6	21492009	0.1711	953680	0.90
MB_15_A7	12124426	0.3813	920138	0.69
MB_15_A8	8662136	0.3879	907627	0.61
MB_15_A9	8121562	0.3877	906963	0.60
MB_15_A10	7423914	0.3842	913174	0.58
MB_15_A11	5969776	0.3829	914899	0.55
MB_15_A12	1784669	0.3847	910843	0.45
MB_15_A13	5370069	0.3850	910313	0.53
MB_15_A14	4929366	0.3849	910520	0.52
MB_15_A15	3900633	0.3849	910520	0.50
MB_15_A16	3761547	0.3849	910520	0.49

MB_15_A17	2720545	0.3845	911265	0.47
MB_15_A18	490832	0.3839	912480	0.41
MB_15_A19	505753	0.3839	912480	0.41
MB_15_A20	490133	0.3837	912752	0.41
MB_15_A21	1159279	0.3824	915349	0.43
MB_15_A22	1344866	0.3817	917053	0.38

Tabla 41 Valorización de MB_15 desglosando Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

9.4.- Anexo D: Resumen de valorización de Macro Bloques

Macro Bloque	Tonelaje	Ley de Cu	Beneficio \$
1	15,514,564	0.651	172,375,300
2	16,357,960	0.890	356,148,211
3	17,910,230	0.765	288,781,803
4	8,895,920	0.754	140,388,539
5	8,974,800	0.846	177,517,781
6	14,271,040	0.886	307,445,594
7	24,665,118	0.901	547,858,258
8	9,645,680	0.973	247,845,055
9	16,619,999	0.634	171,430,888
10	14,500,180	0.760	233,847,740
11	15,841,466	0.613	148,741,857
12	41,128,379	0.767	658,268,989
13	21,586,756	0.756	336,590,608
14	27,462,958	0.511	132,157,690
15	20,450,802	0.652	232,645,284
Total	273,825,852	0.743	4,152,043,597

Tabla 42 Resumen de valorización económica de macro bloques considerando el Costo de Operación como una variable fija.

Macro Bloque	Tonelaje	Ley de Cu	Beneficio \$
1	17,207,791	0.624	174,446,816
2	16,357,960	0.890	359,976,986
3	18,085,430	0.762	294,819,722
4	8,895,920	0.754	140,388,539
5	8,974,800	0.846	177,517,781
6	14,470,480	0.879	311,627,807
7	25,440,718	0.886	549,949,579
8	9,645,680	0.973	248,962,855
9	16,619,999	0.634	178,459,635
10	14,500,180	0.760	235,712,025
11	15,841,466	0.613	155,252,854

12	41,128,379	0.767	666,013,860
13	21,586,756	0.756	341,327,445
14	28,584,798	0.506	135,280,947
15	21,367,855	0.640	233,990,150
Total	278,708,212	0.737	4,203,727,001

Tabla 43 Resumen de valorización económica de macro bloques desglosando el Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.

9.5.- Anexo D: Archivos de precedencias utilizados en las optimizaciones con el Software UDESS

Predecesor	Sucesor	Grupo
MB_1_A0	MB_1_A1	1
MB_1_A1	MB_1_A2	1
MB_1_A2	MB_1_A3	1
MB_1_A3	MB_1_A4	1
MB_1_A4	MB_1_A5	1
MB_1_A5	MB_1_A6	1
MB_1_A6	MB_1_A7	1
MB_1_A7	MB_1_A8	1
MB_1_A8	MB_1_A9	1
MB_1_A9	MB_1_A10	1
MB_1_A10	MB_1_A11	1
MB_1_A11	MB_1_A12	1
MB_1_A12	MB_1_A13	1
MB_1_A13	MB_1_A14	1
MB_2_A0	MB_2_A1	2
MB_2_A1	MB_2_A2	2
MB_2_A2	MB_2_A3	2
MB_2_A3	MB_2_A4	2
MB_2_A4	MB_2_A5	2
MB_2_A5	MB_2_A6	2
MB_2_A6	MB_2_A7	2
MB_2_A7	MB_2_A8	2
MB_2_A8	MB_2_A9	2
MB_2_A9	MB_2_A10	2
MB_2_A10	MB_2_A11	2
MB_2_A11	MB_2_A12	2
MB_2_A12	MB_2_A13	2
MB_2_A13	MB_2_A14	2
MB_2_A14	MB_2_A15	2
MB_2_A15	MB_2_A16	2

MB_2_A16	MB_2_A17	2
MB_2_A17	MB_2_A18	2
MB_2_A18	MB_2_A19	2
MB_2_A19	MB_2_A20	2
MB_2_A20	MB_2_A21	2
MB_2_A21	MB_2_A22	2
MB_3_A0	MB_3_A1	3
MB_3_A1	MB_3_A2	3
MB_3_A2	MB_3_A3	3
MB_3_A3	MB_3_A4	3
MB_3_A4	MB_3_A5	3
MB_3_A5	MB_3_A6	3
MB_3_A6	MB_3_A7	3
MB_3_A7	MB_3_A8	3
MB_3_A8	MB_3_A9	3
MB_3_A9	MB_3_A10	3
MB_3_A10	MB_3_A11	3
MB_3_A11	MB_3_A12	3
MB_3_A12	MB_3_A13	3
MB_3_A13	MB_3_A14	3
MB_3_A14	MB_3_A15	3
MB_4_A0	MB_4_A1	4
MB_4_A1	MB_4_A2	4
MB_4_A2	MB_4_A3	4
MB_4_A3	MB_4_A4	4
MB_4_A4	MB_4_A5	4
MB_4_A5	MB_4_A6	4
MB_4_A6	MB_4_A7	4
MB_4_A7	MB_4_A8	4
MB_5_A0	MB_5_A1	5
MB_5_A1	MB_5_A2	5
MB_5_A2	MB_5_A3	5
MB_5_A3	MB_5_A4	5
MB_5_A4	MB_5_A5	5
MB_5_A5	MB_5_A6	5
MB_5_A6	MB_5_A7	5
MB_5_A7	MB_5_A8	5
MB_6_A0	MB_6_A1	6
MB_6_A1	MB_6_A2	6
MB_6_A2	MB_6_A3	6
MB_6_A3	MB_6_A4	6

MB_6_A4	MB_6_A5	6
MB_6_A5	MB_6_A6	6
MB_6_A6	MB_6_A7	6
MB_6_A7	MB_6_A8	6
MB_6_A8	MB_6_A9	6
MB_6_A9	MB_6_A10	6
MB_6_A10	MB_6_A11	6
MB_6_A11	MB_6_A12	6
MB_6_A12	MB_6_A13	6
MB_6_A13	MB_6_A14	6
MB_7_A0	MB_7_A1	7
MB_7_A1	MB_7_A2	7
MB_7_A2	MB_7_A3	7
MB_7_A3	MB_7_A4	7
MB_7_A4	MB_7_A5	7
MB_7_A5	MB_7_A6	7
MB_7_A6	MB_7_A7	7
MB_7_A7	MB_7_A8	7
MB_7_A8	MB_7_A9	7
MB_7_A9	MB_7_A10	7
MB_7_A10	MB_7_A11	7
MB_7_A11	MB_7_A12	7
MB_7_A12	MB_7_A13	7
MB_7_A13	MB_7_A14	7
MB_7_A14	MB_7_A15	7
MB_7_A15	MB_7_A16	7
MB_7_A16	MB_7_A17	7
MB_7_A17	MB_7_A18	7
MB_7_A18	MB_7_A19	7
MB_7_A19	MB_7_A20	7
MB_7_A20	MB_7_A21	7
MB_7_A21	MB_7_A22	7
MB_8_A0	MB_8_A1	8
MB_8_A1	MB_8_A2	8
MB_8_A2	MB_8_A3	8
MB_8_A3	MB_8_A4	8
MB_8_A4	MB_8_A5	8
MB_8_A5	MB_8_A6	8
MB_8_A6	MB_8_A7	8
MB_8_A7	MB_8_A8	8
MB_8_A8	MB_8_A9	8

MB_8_A9	MB_8_A10	8
MB_9_A0	MB_9_A1	9
MB_9_A1	MB_9_A2	9
MB_9_A2	MB_9_A3	9
MB_9_A3	MB_9_A4	9
MB_9_A4	MB_9_A5	9
MB_9_A5	MB_9_A6	9
MB_9_A6	MB_9_A7	9
MB_9_A7	MB_9_A8	9
MB_9_A8	MB_9_A9	9
MB_9_A9	MB_9_A10	9
MB_9_A10	MB_9_A11	9
MB_9_A11	MB_9_A12	9
MB_9_A12	MB_9_A13	9
MB_9_A13	MB_9_A14	9
MB_9_A14	MB_9_A15	9
MB_9_A15	MB_9_A16	9
MB_9_A16	MB_9_A17	9
MB_9_A17	MB_9_A18	9
MB_10_A0	MB_10_A1	10
MB_10_A1	MB_10_A2	10
MB_10_A2	MB_10_A3	10
MB_10_A3	MB_10_A4	10
MB_10_A4	MB_10_A5	10
MB_10_A5	MB_10_A6	10
MB_10_A6	MB_10_A7	10
MB_10_A7	MB_10_A8	10
MB_10_A8	MB_10_A9	10
MB_10_A9	MB_10_A10	10
MB_10_A10	MB_10_A11	10
MB_10_A11	MB_10_A12	10
MB_10_A12	MB_10_A13	10
MB_10_A13	MB_10_A14	10
MB_10_A14	MB_10_A15	10
MB_11_A0	MB_11_A1	11
MB_11_A1	MB_11_A2	11
MB_11_A2	MB_11_A3	11
MB_11_A3	MB_11_A4	11
MB_11_A4	MB_11_A5	11
MB_11_A5	MB_11_A6	11
MB_11_A6	MB_11_A7	11

MB_11_A7	MB_11_A8	11
MB_11_A8	MB_11_A9	11
MB_11_A9	MB_11_A10	11
MB_11_A10	MB_11_A11	11
MB_11_A11	MB_11_A12	11
MB_11_A12	MB_11_A13	11
MB_11_A13	MB_11_A14	11
MB_11_A14	MB_11_A15	11
MB_11_A15	MB_11_A16	11
MB_11_A16	MB_11_A17	11
MB_11_A17	MB_11_A18	11
MB_11_A18	MB_11_A19	11
MB_11_A19	MB_11_A20	11
MB_11_A20	MB_11_A21	11
MB_12_A0	MB_12_A1	12
MB_12_A1	MB_12_A2	12
MB_12_A2	MB_12_A3	12
MB_12_A3	MB_12_A4	12
MB_12_A4	MB_12_A5	12
MB_12_A5	MB_12_A6	12
MB_12_A6	MB_12_A7	12
MB_12_A7	MB_12_A8	12
MB_12_A8	MB_12_A9	12
MB_12_A9	MB_12_A10	12
MB_12_A10	MB_12_A11	12
MB_12_A11	MB_12_A12	12
MB_12_A12	MB_12_A13	12
MB_12_A13	MB_12_A14	12
MB_12_A14	MB_12_A15	12
MB_12_A15	MB_12_A16	12
MB_12_A16	MB_12_A17	12
MB_12_A17	MB_12_A18	12
MB_12_A18	MB_12_A19	12
MB_12_A19	MB_12_A20	12
MB_12_A20	MB_12_A21	12
MB_12_A21	MB_12_A22	12
MB_12_A22	MB_12_A23	12
MB_12_A23	MB_12_A24	12
MB_12_A24	MB_12_A25	12
MB_12_A25	MB_12_A26	12
MB_12_A26	MB_12_A27	12

MB_12_A27	MB_12_A28	12
MB_12_A28	MB_12_A29	12
MB_12_A29	MB_12_A30	12
MB_12_A30	MB_12_A31	12
MB_12_A31	MB_12_A32	12
MB_12_A32	MB_12_A33	12
MB_12_A33	MB_12_A34	12
MB_13_A0	MB_13_A1	13
MB_13_A1	MB_13_A2	13
MB_13_A2	MB_13_A3	13
MB_13_A3	MB_13_A4	13
MB_13_A4	MB_13_A5	13
MB_13_A5	MB_13_A6	13
MB_13_A6	MB_13_A7	13
MB_13_A7	MB_13_A8	13
MB_13_A8	MB_13_A9	13
MB_13_A9	MB_13_A10	13
MB_13_A10	MB_13_A11	13
MB_13_A11	MB_13_A12	13
MB_13_A12	MB_13_A13	13
MB_13_A13	MB_13_A14	13
MB_13_A14	MB_13_A15	13
MB_13_A15	MB_13_A16	13
MB_13_A16	MB_13_A17	13
MB_13_A17	MB_13_A18	13
MB_13_A18	MB_13_A19	13
MB_13_A19	MB_13_A20	13
MB_13_A20	MB_13_A21	13
MB_13_A21	MB_13_A22	13
MB_13_A22	MB_13_A23	13
MB_13_A23	MB_13_A24	13
MB_13_A24	MB_13_A25	13
MB_13_A25	MB_13_A26	13
MB_14_A0	MB_14_A1	14
MB_14_A1	MB_14_A2	14
MB_14_A2	MB_14_A3	14
MB_14_A3	MB_14_A4	14
MB_14_A4	MB_14_A5	14
MB_14_A5	MB_14_A6	14
MB_14_A6	MB_14_A7	14
MB_14_A7	MB_14_A8	14

MB_14_A8	MB_14_A9	14
MB_14_A9	MB_14_A10	14
MB_14_A10	MB_14_A11	14
MB_14_A11	MB_14_A12	14
MB_14_A12	MB_14_A13	14
MB_14_A13	MB_14_A14	14
MB_14_A14	MB_14_A15	14
MB_14_A15	MB_14_A16	14
MB_14_A16	MB_14_A17	14
MB_14_A17	MB_14_A18	14
MB_14_A18	MB_14_A19	14
MB_14_A19	MB_14_A20	14
MB_14_A20	MB_14_A21	14
MB_14_A21	MB_14_A22	14
MB_14_A22	MB_14_A23	14
MB_14_A23	MB_14_A24	14
MB_14_A24	MB_14_A25	14
MB_14_A25	MB_14_A26	14
MB_15_A0	MB_15_A1	15
MB_15_A1	MB_15_A2	15
MB_15_A2	MB_15_A3	15
MB_15_A3	MB_15_A4	15
MB_15_A4	MB_15_A5	15
MB_15_A5	MB_15_A6	15
MB_15_A6	MB_15_A7	15
MB_15_A7	MB_15_A8	15
MB_15_A8	MB_15_A9	15
MB_15_A9	MB_15_A10	15
MB_15_A10	MB_15_A11	15
MB_15_A11	MB_15_A12	15
MB_15_A12	MB_15_A13	15
MB_15_A13	MB_15_A14	15
MB_15_A14	MB_15_A15	15
MB_15_A15	MB_15_A16	15
MB_15_A16	MB_15_A17	15
MB_15_A17	MB_15_A18	15
MB_15_A18	MB_15_A19	15
MB_15_A19	MB_15_A20	15
MB_15_A20	MB_15_A21	15

Tabla 44 Archivo de precedencias considerando Costo de Operación como una variable fija.

Predecesor	Sucesor	Grupo
MB_1_A0	MB_1_A1	1
MB_1_A1	MB_1_A2	1
MB_1_A2	MB_1_A3	1
MB_1_A3	MB_1_A4	1
MB_1_A4	MB_1_A5	1
MB_1_A5	MB_1_A6	1
MB_1_A6	MB_1_A7	1
MB_1_A7	MB_1_A8	1
MB_1_A8	MB_1_A9	1
MB_1_A9	MB_1_A10	1
MB_1_A10	MB_1_A11	1
MB_1_A11	MB_1_A12	1
MB_1_A12	MB_1_A13	1
MB_1_A13	MB_1_A14	1
MB_1_A14	MB_1_A15	1
MB_1_A15	MB_1_A16	1
MB_2_A0	MB_2_A1	2
MB_2_A1	MB_2_A2	2
MB_2_A2	MB_2_A3	2
MB_2_A3	MB_2_A4	2
MB_2_A4	MB_2_A5	2
MB_2_A5	MB_2_A6	2
MB_2_A6	MB_2_A7	2
MB_2_A7	MB_2_A8	2
MB_2_A8	MB_2_A9	2
MB_2_A9	MB_2_A10	2
MB_2_A10	MB_2_A11	2
MB_2_A11	MB_2_A12	2
MB_2_A12	MB_2_A13	2
MB_2_A13	MB_2_A14	2
MB_2_A14	MB_2_A15	2
MB_2_A15	MB_2_A16	2
MB_2_A16	MB_2_A17	2
MB_2_A17	MB_2_A18	2
MB_2_A18	MB_2_A19	2
MB_2_A19	MB_2_A20	2
MB_2_A20	MB_2_A21	2
MB_2_A21	MB_2_A22	2
MB_3_A0	MB_3_A1	3
MB_3_A1	MB_3_A2	3

MB_3_A2	MB_3_A3	3
MB_3_A3	MB_3_A4	3
MB_3_A4	MB_3_A5	3
MB_3_A5	MB_3_A6	3
MB_3_A6	MB_3_A7	3
MB_3_A7	MB_3_A8	3
MB_3_A8	MB_3_A9	3
MB_3_A9	MB_3_A10	3
MB_3_A10	MB_3_A11	3
MB_3_A11	MB_3_A12	3
MB_3_A12	MB_3_A13	3
MB_3_A13	MB_3_A14	3
MB_3_A14	MB_3_A15	3
MB_3_A15	MB_3_A16	3
MB_3_A16	MB_3_A17	3
MB_3_A17	MB_3_A18	3
MB_4_A0	MB_4_A1	4
MB_4_A1	MB_4_A2	4
MB_4_A2	MB_4_A3	4
MB_4_A3	MB_4_A4	4
MB_4_A4	MB_4_A5	4
MB_4_A5	MB_4_A6	4
MB_4_A6	MB_4_A7	4
MB_4_A7	MB_4_A8	4
MB_5_A0	MB_5_A1	5
MB_5_A1	MB_5_A2	5
MB_5_A2	MB_5_A3	5
MB_5_A3	MB_5_A4	5
MB_5_A4	MB_5_A5	5
MB_5_A5	MB_5_A6	5
MB_5_A6	MB_5_A7	5
MB_5_A7	MB_5_A8	5
MB_6_A0	MB_6_A1	6
MB_6_A1	MB_6_A2	6
MB_6_A2	MB_6_A3	6
MB_6_A3	MB_6_A4	6
MB_6_A4	MB_6_A5	6
MB_6_A5	MB_6_A6	6
MB_6_A6	MB_6_A7	6
MB_6_A7	MB_6_A8	6
MB_6_A8	MB_6_A9	6

MB_6_A9	MB_6_A10	6
MB_6_A10	MB_6_A11	6
MB_6_A11	MB_6_A12	6
MB_6_A12	MB_6_A13	6
MB_6_A13	MB_6_A14	6
MB_6_A14	MB_6_A15	6
MB_7_A0	MB_7_A1	7
MB_7_A1	MB_7_A2	7
MB_7_A2	MB_7_A3	7
MB_7_A3	MB_7_A4	7
MB_7_A4	MB_7_A5	7
MB_7_A5	MB_7_A6	7
MB_7_A6	MB_7_A7	7
MB_7_A7	MB_7_A8	7
MB_7_A8	MB_7_A9	7
MB_7_A9	MB_7_A10	7
MB_7_A10	MB_7_A11	7
MB_7_A11	MB_7_A12	7
MB_7_A12	MB_7_A13	7
MB_7_A13	MB_7_A14	7
MB_7_A14	MB_7_A15	7
MB_7_A15	MB_7_A16	7
MB_7_A16	MB_7_A17	7
MB_7_A17	MB_7_A18	7
MB_7_A18	MB_7_A19	7
MB_7_A19	MB_7_A20	7
MB_7_A20	MB_7_A21	7
MB_7_A21	MB_7_A22	7
MB_7_A22	MB_7_A23	7
MB_8_A0	MB_8_A1	8
MB_8_A1	MB_8_A2	8
MB_8_A2	MB_8_A3	8
MB_8_A3	MB_8_A4	8
MB_8_A4	MB_8_A5	8
MB_8_A5	MB_8_A6	8
MB_8_A6	MB_8_A7	8
MB_8_A7	MB_8_A8	8
MB_8_A8	MB_8_A9	8
MB_8_A9	MB_8_A10	8
MB_9_A0	MB_9_A1	9
MB_9_A1	MB_9_A2	9

MB_9_A2	MB_9_A3	9
MB_9_A3	MB_9_A4	9
MB_9_A4	MB_9_A5	9
MB_9_A5	MB_9_A6	9
MB_9_A6	MB_9_A7	9
MB_9_A7	MB_9_A8	9
MB_9_A8	MB_9_A9	9
MB_9_A9	MB_9_A10	9
MB_9_A10	MB_9_A11	9
MB_9_A11	MB_9_A12	9
MB_9_A12	MB_9_A13	9
MB_9_A13	MB_9_A14	9
MB_9_A14	MB_9_A15	9
MB_9_A15	MB_9_A16	9
MB_9_A16	MB_9_A17	9
MB_9_A17	MB_9_A18	9
MB_10_A0	MB_10_A1	10
MB_10_A1	MB_10_A2	10
MB_10_A2	MB_10_A3	10
MB_10_A3	MB_10_A4	10
MB_10_A4	MB_10_A5	10
MB_10_A5	MB_10_A6	10
MB_10_A6	MB_10_A7	10
MB_10_A7	MB_10_A8	10
MB_10_A8	MB_10_A9	10
MB_10_A9	MB_10_A10	10
MB_10_A10	MB_10_A11	10
MB_10_A11	MB_10_A12	10
MB_10_A12	MB_10_A13	10
MB_10_A13	MB_10_A14	10
MB_10_A14	MB_10_A15	10
MB_11_A0	MB_11_A1	11
MB_11_A1	MB_11_A2	11
MB_11_A2	MB_11_A3	11
MB_11_A3	MB_11_A4	11
MB_11_A4	MB_11_A5	11
MB_11_A5	MB_11_A6	11
MB_11_A6	MB_11_A7	11
MB_11_A7	MB_11_A8	11
MB_11_A8	MB_11_A9	11
MB_11_A9	MB_11_A10	11

MB_11_A10	MB_11_A11	11
MB_11_A11	MB_11_A12	11
MB_11_A12	MB_11_A13	11
MB_11_A13	MB_11_A14	11
MB_11_A14	MB_11_A15	11
MB_11_A15	MB_11_A16	11
MB_11_A16	MB_11_A17	11
MB_11_A17	MB_11_A18	11
MB_11_A18	MB_11_A19	11
MB_11_A19	MB_11_A20	11
MB_11_A20	MB_11_A21	11
MB_12_A0	MB_12_A1	12
MB_12_A1	MB_12_A2	12
MB_12_A2	MB_12_A3	12
MB_12_A3	MB_12_A4	12
MB_12_A4	MB_12_A5	12
MB_12_A5	MB_12_A6	12
MB_12_A6	MB_12_A7	12
MB_12_A7	MB_12_A8	12
MB_12_A8	MB_12_A9	12
MB_12_A9	MB_12_A10	12
MB_12_A10	MB_12_A11	12
MB_12_A11	MB_12_A12	12
MB_12_A12	MB_12_A13	12
MB_12_A13	MB_12_A14	12
MB_12_A14	MB_12_A15	12
MB_12_A15	MB_12_A16	12
MB_12_A16	MB_12_A17	12
MB_12_A17	MB_12_A18	12
MB_12_A18	MB_12_A19	12
MB_12_A19	MB_12_A20	12
MB_12_A20	MB_12_A21	12
MB_12_A21	MB_12_A22	12
MB_12_A22	MB_12_A23	12
MB_12_A23	MB_12_A24	12
MB_12_A24	MB_12_A25	12
MB_12_A25	MB_12_A26	12
MB_12_A26	MB_12_A27	12
MB_12_A27	MB_12_A28	12
MB_12_A28	MB_12_A29	12
MB_13_A0	MB_13_A1	13

MB_13_A1	MB_13_A2	13
MB_13_A2	MB_13_A3	13
MB_13_A3	MB_13_A4	13
MB_13_A4	MB_13_A5	13
MB_13_A5	MB_13_A6	13
MB_13_A6	MB_13_A7	13
MB_13_A7	MB_13_A8	13
MB_13_A8	MB_13_A9	13
MB_13_A9	MB_13_A10	13
MB_13_A10	MB_13_A11	13
MB_13_A11	MB_13_A12	13
MB_13_A12	MB_13_A13	13
MB_13_A13	MB_13_A14	13
MB_13_A14	MB_13_A15	13
MB_13_A15	MB_13_A16	13
MB_13_A16	MB_13_A17	13
MB_13_A17	MB_13_A18	13
MB_13_A18	MB_13_A19	13
MB_13_A19	MB_13_A20	13
MB_13_A20	MB_13_A21	13
MB_13_A21	MB_13_A22	13
MB_13_A22	MB_13_A23	13
MB_13_A23	MB_13_A24	13
MB_13_A24	MB_13_A25	13
MB_13_A25	MB_13_A26	13
MB_14_A0	MB_14_A1	14
MB_14_A1	MB_14_A2	14
MB_14_A2	MB_14_A3	14
MB_14_A3	MB_14_A4	14
MB_14_A4	MB_14_A5	14
MB_14_A5	MB_14_A6	14
MB_14_A6	MB_14_A7	14
MB_14_A7	MB_14_A8	14
MB_14_A8	MB_14_A9	14
MB_14_A9	MB_14_A10	14
MB_14_A10	MB_14_A11	14
MB_14_A11	MB_14_A12	14
MB_14_A12	MB_14_A13	14
MB_14_A13	MB_14_A14	14
MB_15_A0	MB_15_A1	15
MB_15_A1	MB_15_A2	15

MB_15_A2	MB_15_A3	15
MB_15_A3	MB_15_A4	15
MB_15_A4	MB_15_A5	15
MB_15_A5	MB_15_A6	15
MB_15_A6	MB_15_A7	15
MB_15_A7	MB_15_A8	15
MB_15_A8	MB_15_A9	15
MB_15_A9	MB_15_A10	15
MB_15_A10	MB_15_A11	15
MB_15_A11	MB_15_A12	15
MB_15_A12	MB_15_A13	15
MB_15_A13	MB_15_A14	15
MB_15_A14	MB_15_A15	15
MB_15_A15	MB_15_A16	15
MB_15_A16	MB_15_A17	15
MB_15_A17	MB_15_A18	15
MB_15_A18	MB_15_A19	15
MB_15_A19	MB_15_A20	15
MB_15_A20	MB_15_A21	15
MB_15_A21	MB_15_A22	15

Tabla 45 Archivo de precedencias desglosando el Costo de Operación en Costos Fijos y Costos Variables.