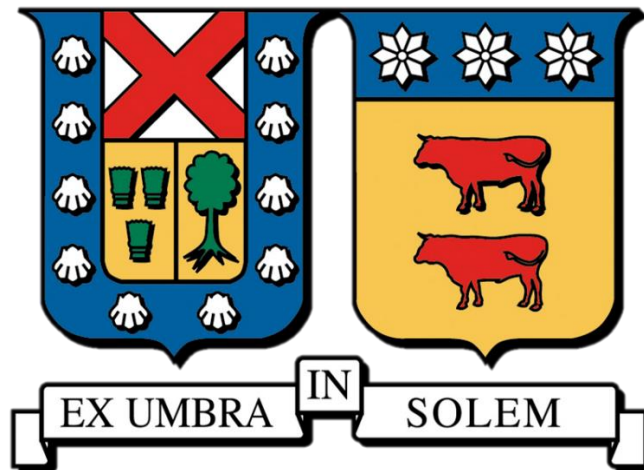


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y
MATERIALES
SANTIAGO, CHILE



**“USABILIDAD DE SOFTWARES MINEROS LIGADOS AL
DISEÑO Y PLANIFICACIÓN MINERA EN CIELO
ABIERTO”**

IGNACIO ANDRÉS CONTRERAS BARROSO
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía: Gonzalo Nelis Suazo

Profesora Co-Guía: Tatiane Marin

Abril, 2024

RESUMEN

Hoy en día es impensable concebir la minería sin el uso de herramientas computacionales para llevar a cabo diversas actividades dentro de la industria. Especialmente en las labores ligadas al diseño y la planificación minera, el uso de softwares les permite a los planificadores desarrollar objetivos estratégicos que guíen la ejecución exitosa de un proyecto minero.

Para ello, los planificadores necesitan desarrollar un plan minero, siendo este la base esencial en las etapas iniciales de cualquier proyecto presente en la minería. Este plan determina cuándo, cómo y cuánto material se moverá a lo largo de la vida útil de un yacimiento. Por lo tanto, contar con softwares para tomar decisiones acertadas resulta fundamental. Sin embargo, existen muchos softwares presentes en el mercado que desarrollan dichas actividades y cada uno sigue su propia metodología. Esta diversidad puede generar incertidumbre respecto a la elección del software en el que invertir, ya sea para el dueño de la empresa minera o para la propia compañía.

Es por ello, que el objetivo principal de este trabajo es proponer una comparación técnica de ventajas y desventajas entre softwares utilizados en la industria minera que cumplan con una planificación de largo plazo. Esta comparación se llevó a cabo con tres softwares comerciales utilizados hoy en día en Chile, Vulcan de Maptek, Doppler de DELPHOS y Studio NPVS de Datamine.

El trabajo consistió en el desarrollo tradicional de la planificación minera de largo plazo, abarcando las etapas de valorización de bloques, generación de pits anidados y determinación de pit final, definición de fases y generación del plan minero para un caso de estudio. Además, se generaron pruebas de sensibilidad respecto a la variación del precio del metal y el ángulo de inclinación del talud aplicado para todo el yacimiento. Lo anterior, se aplicó de la misma manera para todos los softwares utilizando un mismo modelo de bloques y manteniendo todos los parámetros económicos y geométricos fijos.

En cuanto a los resultados de los pits anidados y el pit final, Vulcan generó 58 envolventes con 848 Mt de material total, Doppler 59 con 843 Mt y Studio NPVS 72 con 838 Mt. En base a estos pits anidados se propusieron 3 escenarios para la definición de fases y generación del plan de producción y su posterior análisis. Respecto a los resultados obtenidos de los planes de producción en cada software, se determinó que Doppler fue el software con un mejor plan minero, respetando en su mayoría de periodos, las restricciones de capacidad indicadas por la mina y la planta, mientras que Studio NPVS fue el mejor respecto al mayor VAN reportado. Por último, se reveló que los softwares son mucho más sensibles a la hora del cambio respecto a una variación de precio que al ángulo de talud, siendo Studio NPVS el más sensible.

En conclusión, se demuestra que al trabajar con los mismos escenarios propuestos y siguiendo una metodología tradicional de la planificación de largo plazo, los resultados entre cada software si bien son similares, estos siempre estarán sujetos a los criterios por cada programa, generando diferencias. Sin embargo, todos los softwares cumplen en cuanto a realizar una planificación estratégica.

ABSTRACT

Nowadays it is unthinkable to conceive mining without the use of computational tools to perform various activities within the industry. Especially in mine design and planning, the use of software allows the planners to develop strategic objectives that guide the successful execution of a mining project.

To do this, planners need to develop a mine plan, which is the essential foundation in the early stages of any mining project. This plan determines when, how and how much material will be moved over the life of a deposit. Therefore, it is essential to have software tools to make accurate decisions. However, there are many software in the market that develop such activities and each one follows its own methodology. This diversity can generate uncertainty regarding the choice of software to invest in, either for the owner of the mining company or for the mining company itself.

Therefore, the main objective of this work is to propose a technical comparison of advantages and disadvantages between software used in the mining industry that comply with long term mine planning. This comparison was carried out with three commercial software used today in Chile, Vulcan from Maptek, Doppler from DELPHOS and Studio NPVS from Datamine.

The work consisted of the traditional development of long term mine planning, covering the stages of block valuation, generation of nested pits and determination of final pit, definition of phases and generation of the mine plan for a case study. In addition, sensitivity tests were generated with respect to the variation of the metal price and the slope inclination angle applied for the whole deposit. This methodology was applied in the same way for all software using the same block model and keeping all economic and geometrical parameters fixed.

Regarding the results of the nested pits and the final pit, Vulcan generated 58 envelopes with 848 Mt of total material, Doppler 59 with 843 Mt and Studio NPVS 72 with 838 Mt. Based on these nested pits, 3 scenarios were proposed for the definition of phases and generation of the production plan and its subsequent analysis. Regarding the results obtained from the production plans in each software, Doppler was the software with the best mining plan, complying in most of the periods with the capacity restrictions indicated by the mine and the plant, while Studio NPVS was the best in terms of the NPV reported. Finally, it was revealed that the software is much more sensitive to change with respect to price variation than to slope angle, with Studio NPVS being the most sensitive.

In conclusion, while working with the same proposed scenarios and following a traditional methodology of long-term planning, the results between each software, although similar, will always be subject to the criteria for each program, generating differences. However, all the software comply in terms of performing a strategic planning.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, agradecer a mi familia, mis padres y mis hermanos, que siempre han estado para mí, apoyándome y acompañándome tengo uso de memoria. Gracias por siempre estar, nunca faltarme y por poder ayudarme a desarrollarme como mejor persona cada día.

Agradecer a mis abuelos por su cariño incondicional, en especial a mi Abuelita Eliana que me podrá ver con mi título. A mi Abuelito Hector y mi Abuelita Mariana que a pesar de que no estén, sé que estarán muy felices de mis logros. También agradecer y dedicarle todo mi esfuerzo en lo particular a mi Tata Mario, que dentro de sus sueños estaba poder verme titulado de Ingeniero. Sé que en algún lugar me estará viendo y estará orgulloso de lo que he logrado.

A mis amigos que hice durante este largo camino durante la universidad. Amigos de la carrera (los pipes), amigos de Informática, los de Civil, decirles que fueron una pieza importantísima para seguir adelante. Nunca se olvidarán esos momentos en sala pasta, los catán y los carecaca en mesitas verdes, los cerritos de vez en cuando y por sobre todo, esos apaños a la hora de estudiar en alguna parte de la universidad o por discord.

Agradecer a los cabros del KNI por esa bonita amistad que se ha mantenido fielmente hasta el día de hoy desde que nos conocimos en el Nacional en séptimo básico. Gracias por esas jornadas de rateo, por esas salidas a la playita y esas conversaciones de todo tipo.

A Rocío, quien indirectamente ha estado durante toda mi vida cerca de mí, pero más aún desde el 2014 donde retomamos el contacto. Gracias por estar siempre ahí para mí, por ser tan atenta y cariñosa, espero de corazón nunca faltarnos el uno al otro.

Agradecer a mi profesor Gonzalo que, a pesar de nunca haberlo conocido en alguna sala de clase, decirle que me hubiera encantado asistir a alguna clase con él. Gracias por aguantarme cada martes en esas pequeñas reuniones de avance de la memoria, usted más que nadie sabe las verdaderas trabas para llevar con éxito esta memoria.

Darle las gracias a la gente de Maptek, Delphos y Datamine por facilitarme las licencias de cada software para desarrollar bien esta memoria.

En fin, agradecer a todas las personas con las que compartí estos últimos 6 años de mi vida universitaria que me ayudaron a formarme como Ingeniero y como persona.

Gracias totales!

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo General.....	2
1.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Alcances.....	2
2	ANTECEDENTES.....	3
2.1	Minería a Cielo Abierto	3
2.2	Diseño Minero	3
2.2.1	Parámetros geomecánicos.....	3
2.2.2	Parámetros operativos.....	3
2.2.3	Parámetros Medioambientales.....	3
2.2.4	Parámetros geométricos.....	4
2.3	Planificación Minera.....	5
2.4	Método tradicional de planificación minera computacional de largo plazo	6
2.4.1	Levantamiento geológico	7
2.4.2	Modelo de bloques	7
2.4.3	Generación de pits anidados y definición del pit final óptimo	8
2.4.4	Definición de fases	10
2.4.5	Plan de producción	10
2.4.6	Diseño minero	11
2.5	Softwares Mineros	12
2.5.1	Vulcan, Maptek.....	12
2.5.2	Studio NPVS, Datamine.....	13
2.5.3	Doppler, Delphos.....	13
3	METODOLOGÍA	15
3.1	Metodología particular Vulcan	16
3.1.1	Parámetros de entrada o Inputs.....	16
3.1.2	Pit Optimiser.....	16
3.1.3	Definición de Fases y Plan de producción.....	18
3.2	Metodología particular Doppler.....	19
3.2.1	Parámetros de entrada o Inputs.....	19
3.2.2	Precedencias del software.....	19

3.2.3	Generación de Pits anidados.....	20
3.2.4	Definición de Fases	21
3.2.5	Plan de producción	21
3.3	Metodología particular Studio NPVS	22
3.3.1	Parámetros de entrada o Inputs.....	22
3.3.2	Modelo económico	23
3.3.3	Generación de Pits anidados.....	24
3.3.4	Definición de Fases	24
3.3.5	Generación del Plan de producción	25
4	RESULTADOS CASO DE ESTUDIO A.....	26
4.1	Características Generales	26
4.2	Pits Anidados y Pit Final.....	28
4.2.1	Vulcan.....	28
4.2.2	Doppler	30
4.2.3	Studio NPVS	30
4.2.4	Comparaciones Pit inicial y Pit final	31
4.2.5	Análisis de sensibilidad mediante variación del precio mineral de interés	32
4.3	Fases.....	33
4.3.1	Vulcan.....	33
4.3.2	Doppler	36
4.3.3	Studio NPVS	38
4.4	Plan de producción.....	41
4.4.1	Vulcan.....	41
4.4.2	Doppler	43
4.4.3	Studio NPVS	47
4.5	Comparación de etapas	50
4.5.1	Valorización de bloques.....	50
4.5.2	Pits Anidados y Pit Final	50
4.5.3	Fases	50
4.5.4	Plan de Producción	50
4.6	Comparaciones generales	52
4.7	Matriz de Ventajas y Desventajas	53

5	RESULTADOS CASO DE ESTUDIO B.....	54
5.1	Pits Anidados y Pit final.....	54
5.1.1	Vulcan “By Cutoff”	54
5.1.2	Vulcan “By Revenue”	55
5.1.3	Doppler	56
5.1.4	Studio NPVS	56
5.2	Fases.....	57
5.2.1	Vulcan “By Cutoff”	57
5.2.2	Vulcan “By Revenue”	59
5.2.3	Doppler	61
5.2.4	Studio NPVS	62
5.3	Comparación entre casos de estudio y softwares.....	64
5.3.1	Pits anidados y Pit final	64
5.3.2	Fases	64
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
8	ANEXOS.....	69
A.	Variación porcentual de la sensibilidad del precio por cada software	69
B.	Vistas isométricas de las fases para el método “By Cutoff” Vulcan.....	70
C.	Configuración para definición de fases en Studio NPVS (Caso A).....	71
D.	Distribución de tonelajes de mineral y estéril por fase para cada software (Caso A) 71	
E.	Planes de producción para el método “By Cutoff”, Vulcan.....	72
F.	Especificaciones técnicas de cada hardware	74
G.	Gráficos Pit by Pit Caso de estudio B.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales componentes geométricos de un talud minero	4
Figura 2. Resumen del método tradicional de planificación minera de largo plazo	6
Figura 3. Generación de pits anidados (Vista Isométrica derecha – Vista planta)	9
Figura 4. Secuencias esquemáticas de explotación del Best (1) y el Worst (2) Case.....	10
Figura 5. Mina Lomas Bayas I, Comuna de Sierra Gorda, Antofagasta	11
Figura 6. Diferencias entre un pit matemático versus un pit operativizado	12
Figura 7. Yacimiento a cielo abierto operativizado en Vulcan	12
Figura 8. Modelo de bloques en Studio NPVS.....	13
Figura 9. Vista de perfil de pushbacks generados en Doppler.....	14
Figura 10. Curva tonelaje ley del modelo de bloques	26
Figura 11. Histograma de Ley de Cu del modelo de bloques.....	27
Figura 12. Gráfico Pit by Pit obtenido por el método “By Cutoff”, Vulcan.....	29
Figura 13. Gráfico Pit by Pit obtenido por el método “By Revenue”, Vulcan.....	29
Figura 14. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler.....	30
Figura 15. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS	31
Figura 16. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 3 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan.....	34
Figura 17. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 4 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan.....	34
Figura 18. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 5 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan.....	35
Figura 19. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Revenue”, Vulcan.....	35
Figura 20. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Revenue”, Vulcan.....	36
Figura 21. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para los escenarios de 3 y 4 fases Doppler	36
Figura 22. Gráfico de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 5 fases Doppler ..	37
Figura 23. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Doppler	37
Figura 24. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Doppler	38
Figura 25. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para los escenarios de 3 y 4 fases Studio NPVS	39
Figura 26. Gráfico de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 5 fases Studio NPVS	39
Figura 27. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Studio NPVS	40
Figura 28. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Studio NPVS...	40
Figura 29. Plan de producción 3 fases “By Revenue” en Vulcan.....	41
Figura 30. Plan de producción 4 fases “By Revenue” en Vulcan.....	42
Figura 31. Plan de producción 5 fases “By Revenue” en Vulcan.....	42
Figura 32. Plan de producción 3 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	44
Figura 33. Plan de producción 3 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	44
Figura 34. Plan de producción 4 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	45
Figura 35. Plan de producción 4 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	45

Figura 36. Plan de producción 5 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	46
Figura 37. Plan de producción 5 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler.....	46
Figura 38. Plan de producción 3 fases obtenido en Studio NPVS	48
Figura 39. Plan de producción 4 fases obtenido en Studio NPVS	48
Figura 40. Plan de producción 5 fases obtenido en Studio NPVS	49
Figura 41. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Vulcan “By Cutoff” (Caso B).....	58
Figura 42. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Cutoff” (Caso B).....	58
Figura 43. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Cutoff” (Caso B).....	59
Figura 44. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Vulcan “By Revenue” (Caso B)	59
Figura 45. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Revenue” (Caso B).....	60
Figura 46. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Revenue” (Caso B).....	60
Figura 47. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Doppler (Caso B).....	61
Figura 48. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Doppler (Caso B)	61
Figura 49. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Doppler (Caso B)	62
Figura 50. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Studio NPVS (Caso B)	62
Figura 51. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Studio NPVS (Caso B)	63
Figura 52. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Studio NPVS (Caso B).....	63
Figura 53. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Cutoff”, Vulcan	70
Figura 54. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Cutoff”, Vulcan	70
Figura 55. Plan de producción 3 fases “By Cutoff” en Vulcan	72
Figura 56. Plan de producción 4 fases “By Cutoff” en Vulcan	73
Figura 57. Plan de producción 5 fases “By Cutoff” en Vulcan	73
Figura 58. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan “By Cutoff” (Caso B1).....	74
Figura 59. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan “By Cutoff” (Caso B2).....	75
Figura 60. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan “By Revenue” (Caso B1).....	75
Figura 61. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan “By Revenue” (Caso B2).....	76
Figura 62. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler (Caso B1)	76
Figura 63. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler (Caso B2)	77
Figura 64. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS (Caso B1).....	77
Figura 65. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS (Caso B2).....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplo de definición de bearings y slopes en Doppler.....	20
Tabla 2. Características del modelo de bloques.....	26
Tabla 3. Estadísticas básicas de la ley de cobre y la densidad.....	26
Tabla 4. Estadísticas de la Ley de Cu por cada unidad geológica	27
Tabla 5. Parámetros económicos y geomecánicos.....	28
Tabla 6. Comparación de características del primer Pit por cada software	31
Tabla 7. Comparación de características del último Pit por cada software	32
Tabla 8. Resultados del análisis de sensibilidad del precio obtenidos en cada software.....	33
Tabla 9. Información obtenida de cada plan de producción en Vulcan	43
Tabla 10. Información obtenida de cada plan de producción en Doppler	47
Tabla 11. Información obtenida de cada plan de producción en Studio NPVS.....	49
Tabla 12. Comparación del VAN por cada software	51
Tabla 13. Comparación de ventajas y desventajas disponibles en cada software	53
Tabla 14. Nueva configuración geométrica de las paredes del talud.....	54
Tabla 15. Comparación de características del primer pit para Vulcan por “By Cutoff”.....	54
Tabla 16. Comparación de características del último pit para Vulcan por “By Cutoff”.....	54
Tabla 17. Comparación de características del primer pit para Vulcan por “By Revenue” ...	55
Tabla 18. Comparación de características del último pit para Vulcan por “By Revenue” ...	55
Tabla 19. Comparación de características del primer pit en Doppler (Caso B)	56
Tabla 20. Comparación de características del último pit en Doppler (Caso B).....	56
Tabla 21. Comparación de características del primer pit en Studio NPVS (Caso B).....	57
Tabla 22. Comparación de características del último pit en NPVS (Caso B)	57
Tabla 23. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Vulcan para ambos métodos de valorización de bloques	69
Tabla 24. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Doppler	69
Tabla 25. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Studio NPVS	69
Tabla 26. Cantidad de roca total mínima para cada fase Studio NPVS (Caso A)	71
Tabla 27. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Vulcan “By Cutoff”	71
Tabla 28. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Vulcan “By Revenue”	71
Tabla 29. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Doppler.....	72
Tabla 30. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Studio NPVS	72
Tabla 31. Especificaciones del hardware utilizado en Vulcan y Studio NPVS	74
Tabla 32. Especificaciones del hardware utilizado en Doppler.....	74

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día el uso de softwares como herramientas de trabajo está muy normalizado en la vida cotidiana. Ya sean para usos académicos o laborales, la sociedad está inmersa en el uso de estas nuevas tecnologías y la industria minera no está ajena a esto, puesto que los softwares en la minería ayudan en labores que van desde la planificación, el diseño hasta la gestión de las operaciones de la vida útil de un yacimiento minero de cielo abierto o subterráneo.

La implementación de estos softwares en las últimas décadas ha aportado de manera significativa a la industria minera según Minería Chilena (2014). Estos programas mejoran la eficiencia al anticiparse a temas relacionados a costos y producción. Jiménez del Valle (2014), destaca que esta eficiencia se debe a que estos softwares permiten la programación de procesos iterativos, evaluando así un mayor número de escenarios y mejorando la información disponible para la toma de decisiones

Es por eso que, la planificación minera es un proceso sumamente importante dentro del negocio minero y se puede entender como la organización de un conjunto de actividades que permiten alcanzar una meta determinada por las empresas mineras (Loor, 2020), donde se definen los recursos y las reservas a extraer del yacimiento y la capacidad de tratamiento adecuada respecto al tamaño de la mina.

Dentro de la documentación de la planificación minera no se encuentra como tal una secuencia oficial que indique paso a paso el desarrollo de este proceso. No obstante, existe una metodología tradicional comúnmente utilizada para llevar a cabo esta tarea. Este proceso consiste en las siguientes etapas secuenciales: definición de parámetros técnico-económicos, cálculo de pits anidados, cálculo del pit final, definición de fases, elaboración del diseño minero, construcción del plan minero y evaluación económica (Meneses, 2022).

Ahora bien, los softwares mineros para labores de diseño y de planificación minera son herramientas bastante más utilizadas en la gran minería, los cuales pueden suplir los costos de adquisición de softwares debido a la gran masa monetaria que poseen. No siendo así el caso de la pequeña y mediana minería, quienes no siempre pueden contar con los recursos económicos para adquirir dichos programas. Además, estas empresas no cuentan con el conocimiento de otros softwares presentes hoy en día en circulación (AMTC, 2021).

Es por esto que surge la necesidad de conocer cuál software es más adecuado en la actualidad al tomar la decisión en una empresa minera, ya sea para comprar o arrendar al corto o mediano plazo, con el fin de cumplir con las expectativas de la empresa de la mejor manera. Esto permitiría a las compañías mineras o instituciones ligadas al rubro, tener varias opciones de softwares conocidos y así reducir costos, tiempos de búsqueda y toma de decisiones en la adquisición de ellos.

Bajo lo mencionado anteriormente, es que en esta memoria se busca proponer una comparación técnica entre los softwares que cumplan con labores de planificación minera, indicando las ventajas y desventajas entre cada uno de manera cualitativa y cuantitativa.

1.1 Objetivo General

- Proponer una comparación técnica de ventajas y desventajas entre softwares utilizados en la industria minera, que permitan desarrollar trabajos de las etapas secuenciales de la planificación minera de largo plazo.

1.2 Objetivos Específicos

- Describir el proceso de trabajo por cada software minero a utilizar en este estudio.
- Comparar el método para la definición de los pits anidados y el pit final por cada software.
- Comparar la metodología para la definición de fases en cada software.
- Comparar el plan de producción elaborado en cada software, utilizando los mismos parámetros en cada uno.
- Distinguir las diferencias de las principales características de los pits al variar el precio del metal de interés y el ángulo de talud para todo el yacimiento.
- Elaborar una matriz de las ventajas y desventajas existentes entre cada software.

1.3 Alcances

- Solo se analizará la explotación a cielo abierto.
- Se analizarán dos casos de estudio que estarán representados con un mismo modelo de bloques.
- Los softwares mineros que se utilizarán son: Studio NPVS de Datamine, Vulcan de Maptek y Doppler del laboratorio Delphos de la Universidad de Chile.
- El trabajo en los softwares de Vulcan y Studio NPVS, se desarrollarán en un mismo hardware con mejores características que el que se utilizará con Doppler, por lo cual no se podrá realizar una buena comparación de los tiempos de cómputo entre cada programa.

2 ANTECEDENTES

2.1 Minería a Cielo Abierto

La minería a cielo abierto es un método de extracción de minerales que consiste en un conjunto de pits o pozos superficiales en los que se extraen bancos horizontales de material desde arriba hacia abajo, a lo que se conoce como banqueo descendente con secciones verticales (Herrera & Pla Ortiz de Urbina, 2006).

Ahora bien, la minería a cielo abierto es un proceso donde el diseño y la planificación minera son fundamentales para llevar a cabo las operaciones de manera eficiente, segura y sostenible. Estas áreas de la minería buscan maximizar la recuperación de minerales, reducir impactos ambientales, cumplir con regulaciones, garantizar la seguridad laboral. Esto beneficia tanto a las empresas mineras como a las comunidades y el medio ambiente, logrando así un buen negocio minero.

2.2 Diseño Minero

Un correcto diseño minero permite llevar a cabo las operaciones mineras de manera exitosa en el futuro, por lo cual, realizar de manera correcta esta actividad es de suma importancia en la industria minera. Su relevancia radica en la planificación de las labores mineras, la optimización de los recursos disponibles respecto al control y calidad de los minerales, la seguridad de los trabajadores y la minimización de impactos ambientales (Recalde & Morante, 2009).

Así mismo, para poder realizar la extracción correcta del material valioso, es necesario contemplar ciertos parámetros que conllevan estas operaciones, de tal manera de que sea rentable y sustentable la explotación del yacimiento.

2.2.1 Parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos se centran en el estudio de las propiedades de las rocas circundantes y su comportamiento bajo condiciones de carga y tensión. Estos parámetros son dependientes de los ángulos estables de los taludes, en cada dominio geotécnico dentro del yacimiento a estudiar (Recalde & Morante, 2009).

2.2.2 Parámetros operativos

Estos parámetros tienen que ver con las dimensiones necesarias para que la maquinaria empleada en las labores mineras trabaje en condiciones adecuadas de eficiencia y seguridad. Aquí es necesario analizar la operativización de las rampas, teniendo en cuenta las alturas de los bancos, anchos de bermas y pistas, anchuras de fondo, entre otros (Recalde & Morante, 2009). Los parámetros operativos nacen a partir de un análisis previo de los parámetros geomecánicos y geométricos.

2.2.3 Parámetros Medioambientales

Estos parámetros tienen que facilitar la restauración a futuro de los terrenos degradados por los trabajos mineros o, en su defecto, disminuir los impactos ambientales producidos durante las labores (Recalde & Morante, 2009).

2.2.4 Parámetros geométricos

Los parámetros geométricos en el diseño minero abarcan aspectos clave relacionados con la estructura y morfología del yacimiento, como lo son las pendientes de los terrenos, alturas y ángulos de bancos, entre otros (Recalde & Morante, 2009).

Comprender cómo configurar la mina en términos de profundidad, longitud, ancho y accesos, es esencial para maximizar la recuperación de recursos y garantizar la seguridad de los trabajadores y los equipos a utilizar.

A continuación, en la Figura 1 se ilustran los principales parámetros geométricos que se consideran en el diseño de un talud en la industria minera:

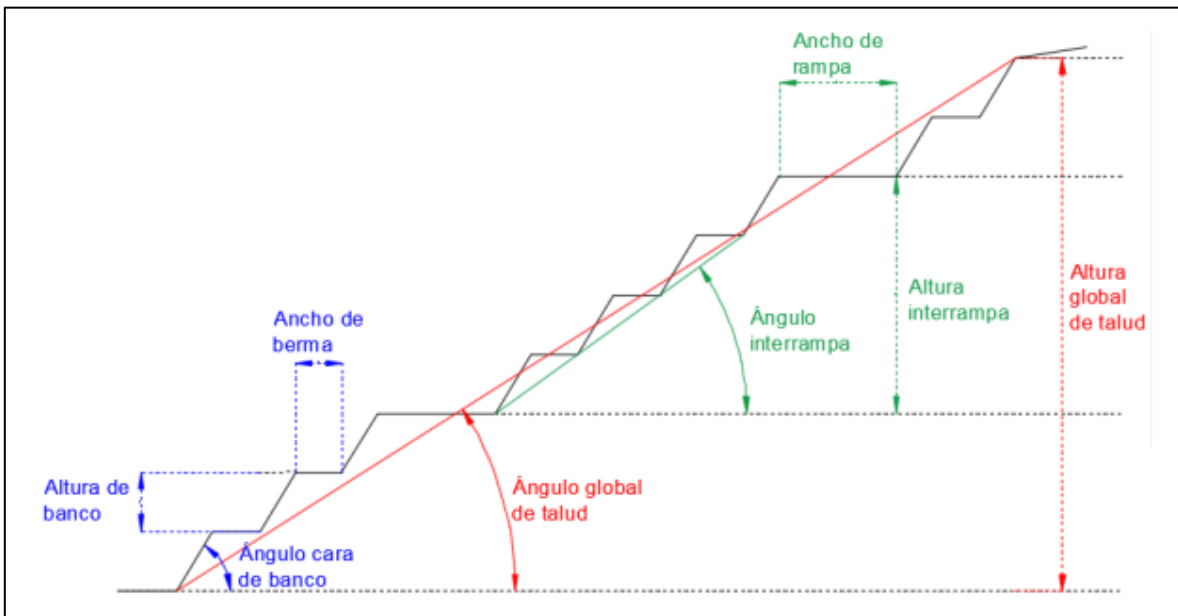


Figura 1. Principales componentes geométricos de un talud minero

Fuente: (Díaz, 2017)

A continuación, se detalla cada concepto geométrico del diseño de un talud minero presentado en la figura anterior:

- **Altura de banco:** Están determinados por los equipos mineros usados para las labores de perforación y tronadura, y los equipos utilizados en carguío. Se suelen usar bancos entre los 12-15 metros (Ryan & Pryor, 2000).
- **Ancho de berma:** Corresponde a la distancia horizontal desde la cresta del banco hasta la pata del siguiente banco superior. Su funcionalidad es retener las caídas o desprendimientos de rocas (Díaz, 2017).
- **Ángulo cara de banco:** Es el ángulo formado por la horizontal proyectada de la berma y la cresta del mismo banco. El ángulo de estos variará dependiendo de la calidad del macizo rocoso (Ryan & Pryor, 2000).

- **Altura interrampa:** Corresponde a la distancia vertical proyectada entre la pata de un banco hasta la pata del banco que colinda con la rampa contenida entre ellos.
- **Ancho de rampa:** Corresponde a la distancia determinada por los equipos que transitan en sus labores mineras, más ciertas distancias que satisfacen la seguridad del personal y equipos mineros.
- **Ángulo interrampa:** Corresponde a la inclinación medida desde la pata del banco superior, donde se encuentra una rampa, hasta la cresta del banco donde se encuentra la siguiente rampa.
- **Altura global de talud:** Corresponde a la distancia vertical proyectada entre la pata del banco del fondo del pit y la cresta del banco que colinda con la superficie topográfica (Díaz, 2017).
- **Ángulo global de talud:** Este ángulo se mide desde la pata del banco del fondo del pit hasta la cresta del banco que colinda con la superficie topográfica.

2.3 Planificación Minera

Al igual que el diseño minero, la planificación es otro pilar fundamental en el rubro y se puede entender como un proceso completo, en el cual se determina la manera de cómo y cuánto material se extraerá de un determinado yacimiento minero, de tal manera de determinar su ritmo de producción y, con ello, su vida útil. Lo anterior, se realiza con el fin de maximizar el beneficio al corto, mediano y largo plazo para la empresa minera.

Por lo tanto, para poder llevar a cabo un buen negocio minero se distinguen tres etapas de la planificación minera (Troncoso, 2006):

- **Planificación Estratégica:** consiste en definir una estrategia de negocio donde se relacionen todos los factores que maximicen el valor de los recursos minerales con su mercado respectivo, de tal manera de obtener el mayor beneficio para la empresa.
- **Planificación Conceptual:** es un proceso que involucra la delimitación de los recursos minerales y físicos existentes, con el propósito de alcanzar los objetivos de producción establecidos, como parte de la planificación estratégica. Generalmente, esta etapa se enmarca dentro de un proyecto minero específico y se definen las reservas de la mina, su capacidad y vida útil. En esta etapa es donde se realiza el plan minero del yacimiento.
- **Planificación Operativa:** una vez que la mina ya entra en operaciones, inicia este tipo de planificación, donde lo que se busca es la optimización de los recursos, ya sean humanos, equipos mineros o procesos que conduzcan a lograr el plan minero definido en la planificación conceptual. Por lo tanto, en esta etapa se produce una retroalimentación de la etapa anterior y, se vuelven a obtener indicaciones operacionales y financieras, de tal manera de que se continúe obteniendo el máximo provecho del negocio minero.

Además de las etapas de la planificación minera mencionadas anteriormente, existen horizontes temporales en donde también se pueden diferenciar tipos de planificación cuyos objetivos pueden variar dependiendo de la cantidad de información que se disponga al momento de realizar los estudios de ingeniería (Johnson, 1968).

- **Planificación minera de largo plazo:** aquí se definen los límites del yacimiento, ya sea de manera económica como física. Es decir, se define el pit óptimo final del yacimiento. Lo anterior es consecuencia de que en esta etapa se define la capacidad productiva, la vida útil y las leyes de corte.
- **Planificación minera de mediano plazo:** esta planificación tiene como objetivo producir modelos y planes de producción que permitan conducir las labores mineras a las metas establecidas en el largo plazo.
- **Planificación minera de corto plazo:** esta planificación se relaciona con las actividades del presente, y dentro de sus objetivos está la recopilación de información operacional, logrando así, que sea utilizada para retroalimentar la planificación a largo plazo y permitir que esta sea más eficiente.

2.4 Método tradicional de planificación minera computacional de largo plazo

Como se mencionó anteriormente, uno de los objetivos clave de la planificación minera a largo plazo es determinar el pit óptimo final del yacimiento. Para lograr esto, es necesario seguir una serie de etapas secuenciales utilizando diversos softwares mineros disponibles en el mercado y relacionados con la planificación minera. Estas etapas se describen detalladamente a partir de la Figura 2, que ilustra el proceso.

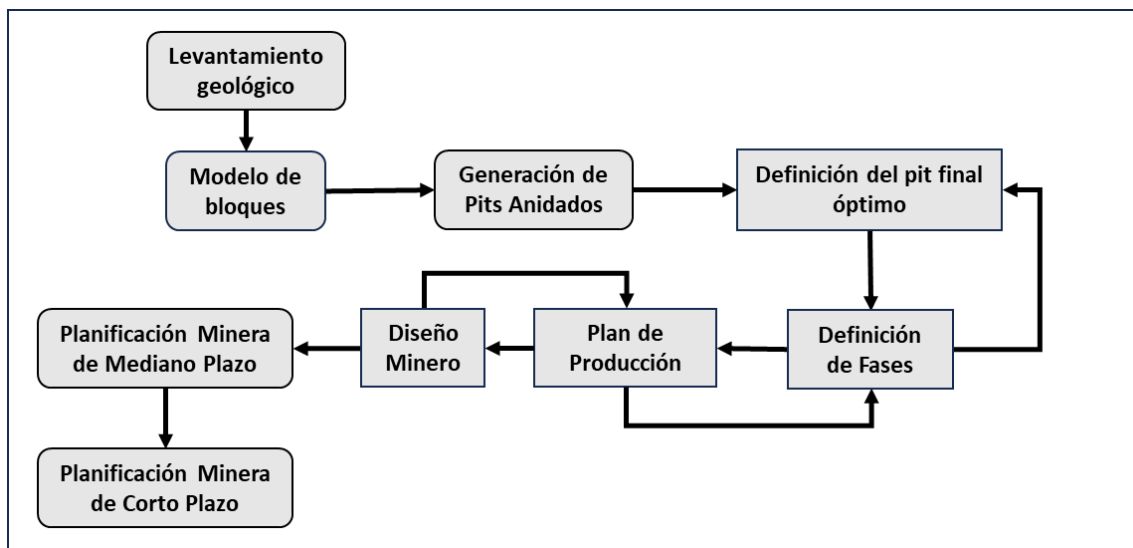


Figura 2. Resumen del método tradicional de planificación minera de largo plazo

Fuente: Elaboración propia

2.4.1 Levantamiento geológico

Es el primer paso, se realiza en las etapas de prospección y exploración de un yacimiento minero, donde a partir de campañas de sondajes, se rescata información geológica del lugar en forma de modelos geológicos y modelos de recursos del depósito. Dentro de la información geológica se encuentran los tipos de minerales presentes en el posible yacimiento, la distribución litológica, posición espacial de las leyes, densidad, recuperación, entre otros.

2.4.2 Modelo de bloques

El modelo de recursos obtenido de los trabajos realizados en la etapa de exploración es lo que se conoce como modelo de bloques, el cual es una representación de la realidad construida mediante estimaciones geoestadísticas de las leyes de un depósito de mineral.

Respecto a los inputs o parámetros de entrada que construyen un modelo de bloques, corresponden a los atributos de interés que contiene en particular cada bloque, teniéndose aquí información geológica, geotécnica, metalúrgica, contaminantes, entre otros.

Ahora bien, es importante obtener el beneficio por bloque para poder determinar, a priori, si efectivamente es rentable el negocio minero ajustado a las restricciones indicadas por los planificadores mineros. Para esto, se fijan parámetros económicos, que pueden ser fijos o variables en el tiempo y están asociados a diferentes actividades mineras, ya sean de extracción de material, procesamiento o comerciales. En la Ecuación 1, se presenta una de las ecuaciones más usadas para determinar el beneficio por bloque:

$$B_b = M \cdot [(P - C_{ryv}) \cdot R \cdot F \cdot Lm - (Cm + C_p)] \quad (1)$$

Donde:

B_b = Beneficio del bloque.

M = Tonelaje de bloque.

P = Precio de venta del mineral.

C_{ryv} = Costo de refinación y ventas.

R = Recuperación metalúrgica.

F = Factor de conversión de unidades.

Lm = Ley media del bloque.

Cm = Costo mina.

C_p = Costo planta o de procesamiento.

Además de la ecuación ya mencionada para obtener el beneficio por bloque, existe el Net Smelter Return (NSR), el cual es un modelo utilizado en la evaluación económica de depósitos polimetálicos y proporciona una opción para determinar las leyes de corte. Conceptualmente, el NSR está representado por el valor total de los metales recuperados por cada tonelada de mineral, menos, su costo de fundición (Shava, 2018).

Una estrategia económica para definir un programa de producción o destino de los bloques es el cálculo de la ley de corte, la cual es un concepto económico, utilizado en la planificación minera para determinar si el material a extraer contiene suficiente valor económico de tal manera que sea rentable extraerlo, y así, se justifiquen las operaciones para su explotación. En otras palabras, la ley de corte es un punto de inflexión donde se diferencia lo que es estéril y lo que es mineral, ya sea este de baja o alta ley.

Siguiendo el punto anterior, la ley de corte crítica " L_C " es aquella que convierte en cero el beneficio de procesar un bloque, y si se asocia este concepto con la Ecuación 1, esta ley de corte quedará determinada por la Ecuación 2:

$$L_C = \frac{C_m + C_p}{(P - C_{vyr}) \cdot R} \quad (2)$$

Bajo esta misma línea, existe también la ley de corte marginal " L_{CM} ", las cuales se utilizan para decidir la ruta del mineral extraído, ya sea para almacenarlo en stockpiles de baja ley y procesarlo en el futuro, o para el procesamiento inmediato (Rendu, 2014).

El valor de la ley de corte puede variar según el tipo de mineral, la tecnología disponible, los costos de extracción y procesamiento, y otros factores económicos y técnicos. Su determinación es fundamental en la planificación de una operación minera y en la toma de decisiones sobre la viabilidad económica de un proyecto minero.

2.4.3 Generación de pits anidados y definición del pit final óptimo

En un comienzo donde ya se asumieron precios y costos para la valorización de los bloques, y donde ya se conocen los diferentes parámetros geométricos del yacimiento, se procede al cálculo de los pits anidados. Para esto, existen varios algoritmos que indican cómo realizar este cálculo y luego cómo definir la envolvente.

Uno de los métodos para el cálculo de los pits anidados es el algoritmo de Lerchs & Grossman (1965), donde su función objetivo es maximizar el beneficio de la extracción de cada pit basado en la valorización de cada bloque (Ecuación 1) y su ubicación espacial dentro del yacimiento. Esta ubicación, que contiene las coordenadas tridimensionales x,y,z de los bloques, es de suma importancia, dado que por más que existan bloques con alto valor económico, estos no pueden ser extraídos hasta que los bloques precedentes sean sacados, asegurando una estabilidad en las operaciones.

La metodología se basa en un producto que tiene como factores los bloques valorizados y diferentes Revenue Factors (RF) o ponderadores de precios, donde cada uno de estos va generando diferentes escenarios económicos, maximizando el valor total del pit anidado.

En la mayoría de los casos, este proceso al ir variando el precio de los metales, indica una razón directamente proporcional entre el valor del RF utilizado y el tamaño del pit analizado. Sin embargo, existen casos donde diferentes RF generan envolventes de un mismo tamaño. De esta manera, el algoritmo se quedará con el pit que maximice su valor para cada RF, generando pits anidados hasta la envolvente final óptima.

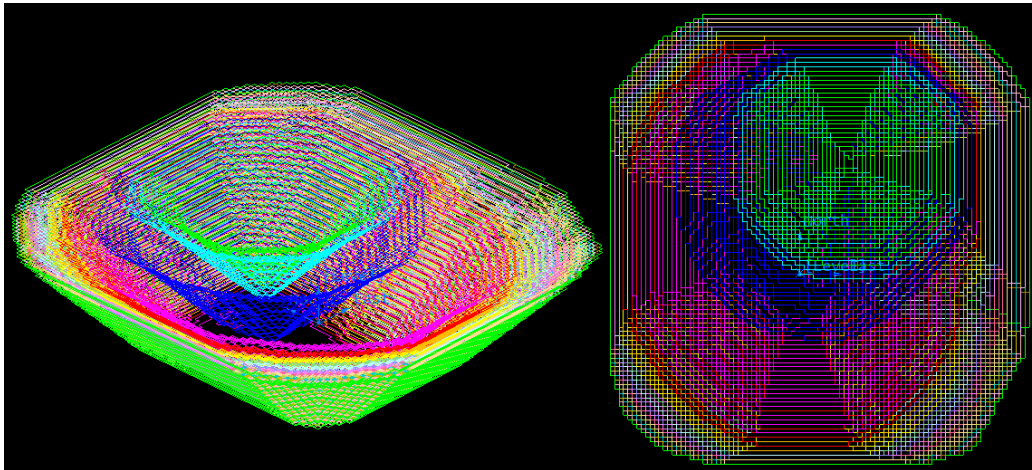


Figura 3. Generación de pits anidados (Vista Isométrica derecha – Vista planta)

Fuente: Elaboración propia

Una vez generados los pits anidados del yacimiento, se realiza una evaluación económica de tal modo de poder delimitar el rajo hasta un punto donde ya no sea económicamente rentable seguir explotándolo. Para esto, se consideran parámetros fijos como el ritmo de producción mina, el ritmo de procesamiento a planta y una tasa de descuento ya sea fija o variable dependiendo del planificador.

Esta evaluación económica considerará además dos secuencias de extracción denominadas Best Case y Worst Case. La primera secuencia de extracción se realiza pit a pit, donde se remueve el material en orden descendente. En este caso durante los primeros años de la explotación del yacimiento se generan mayores utilidades debido a que existe una relación inversamente proporcional entre la Razón Estéril-Mineral (REM) con la profundidad del yacimiento, extrayendo bajas cantidades de material en los primeros años de explotación y altas cantidades en los últimos años.

El segundo caso de extracción se realiza banco a banco y también se realiza de manera descendente. En este caso ocurre lo contrario al Best Case, donde se extraen grandes cantidades de material en los primeros años de producción y bajas cantidades al final de la vida útil, provocando una relación inversamente proporcional entre la Razón Estéril-Mineral (REM) con la profundidad del yacimiento. Este caso genera que exista un menor beneficio neto en los primeros años de explotación.

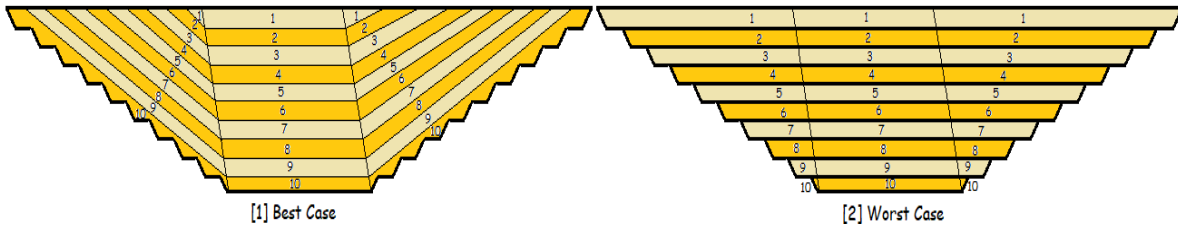


Figura 4. Secuencias esquemáticas de explotación del Best (1) y el Worst (2) Case

Fuente: Elaboración propia

Teniendo ambos escenarios de extracción presentes se determina cuál de todos los pits anidados corresponde al pit óptimo final, considerando al mismo tiempo la función objetivo de la compañía minera, la cual puede ser maximizar la vida útil del yacimiento, maximizar el VAN, minimizar riesgos económicos, entre otros.

2.4.4 Definición de fases

El conjunto de pits anidados que se encuentran dentro del pit final y que siguen ciertas restricciones económicas y operacionales reciben el nombre de fases o pushbacks y son la base para el diseño minero. Dentro de estas restricciones operacionales está que la distancia entre el límite entre una fase y otra sea acorde a los equipos mineros que transitarán dentro del yacimiento, es decir, que tienen que cumplir espaciamientos expeditos y seguros para el acceso y salida del personal desde cualquier parte de ellas (Ministerio de Minería, 2004). Esta selección de equipos está directamente ligada a la capacidad de tratamiento mina y/o planta determinada por cada compañía minera.

Sin embargo, en la industria minera el proceso para definir fases todavía son reglas o criterios que no están oficializados de alguna manera y estos suelen ser particulares dependiendo de cada proyecto minero y de cada empresa (Jiménez Del Valle, 2014).

2.4.5 Plan de producción

Esta es la etapa final del método tradicional de la planificación minera de largo plazo y es aquí donde al trabajo ya realizado se le incorpora la variable tiempo, determinando cuándo y cuánto estéril y mineral se extraerá y procesará a lo largo de los periodos de la vida útil del yacimiento. Junto con ello, se determina el destino de cada material ya sean stockpiles, botaderos, plantas de procesamiento, entre otros.

La definición de fases y el plan minero están muy asociados, puesto que son etapas secuenciales que se determinan mediante procesos iterativos buscando maximizar el beneficio total del plan de producción, haciendo variar los límites de cada fase (Vargas, 2011). Para poder obtener mejores resultados en esta etapa, se aplican diferentes tipos de restricciones a lo largo de la vida útil del yacimiento, donde estas pueden ser respecto a la capacidad de movimiento mina y de planta, restricciones económicas y/o en cuanto a la cantidad de bancos por fases.

2.4.6 Diseño minero

Terminado el proceso de selección de fases y del plan de producción, se inician las labores de diseño para dar paso futuro a la planificación de mediano y corto plazo. Es en esta etapa donde principalmente se procede a operativizar todo el trabajo ya realizado, desde los pits anidados hasta las fases. En este apartado se incorpora todo el diseño del sistema de rampas y los factores que conlleva su diseño, tales como: pendiente, ancho (teniendo en consideración el cálculo de seguridad de una rampa), accesos, salidas, entre otros.

Ahora bien, dependiendo de la geometría del yacimiento, el diseño de rampas puede ser de manera continua o puede contener switchbacks. En el primer caso, las rampas continuas permiten una velocidad de transporte de equipos mineros más constante, debido a que no tienen curvas pronunciadas, realizando ciclos de carguío y transporte más rápidos. En el segundo caso, las rampas que contienen switchbacks, disminuyen los tiempos en los ciclos de carguío y transporte, debido a las curvas pronunciadas, provocando una disminución en la velocidad de los equipos. Sin embargo, la existencia de estos permite generar diferentes accesos dentro del yacimiento, aumentando la flexibilidad de las operaciones y la seguridad de transporte (Jiménez Del Valle, 2014). En la Figura 5 se presenta un rajo que emplea ambos métodos, donde se observa de color rojo la rampa continua y de color verde el uso de switchbacks para su diseño.

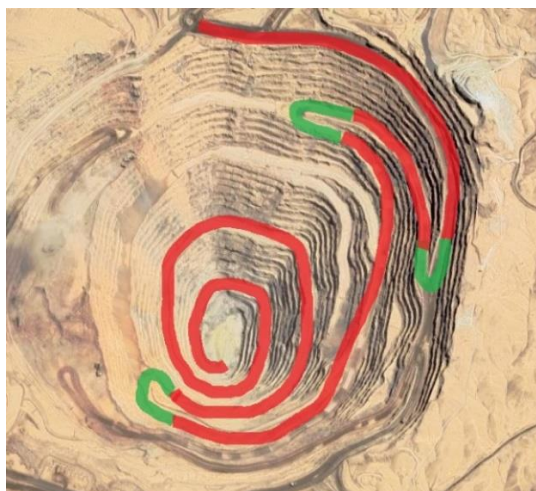


Figura 5. Mina Lomas Bayas I, Comuna de Sierra Gorda, Antofagasta

Fuente: Elaboración Propia

En consecuencia, la operativización de un rajo cambia la situación respecto a las cubicaciones que ya se tenían al momento de la definición de las fases, debido a que la confección de rampas implica una mayor remoción de material de las paredes del pit, lo cual puede disminuir o aumentar la cantidad de estéril o mineral que se tenía contemplado.

Como respuesta a dicho cambio, lo correcto sería volver a cubicar el yacimiento y posteriormente realizar un plan de producción que cumpla los diferentes criterios que solicite una compañía minera. A continuación, en la Figura 6 se presenta una figura que ilustra una comparación entre el pit matemático (negro) y el pit operativizado (azul).

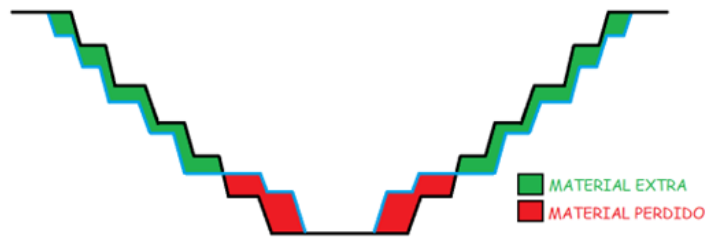


Figura 6. Diferencias entre un pit matemático versus un pit operativizado

Fuente: Elaboración Propia

2.5 Softwares Mineros

Son variados los softwares que existen hoy en día que permiten llevar a cabo las operaciones mineras a nivel de planificación y de diseño. A continuación, se detallará brevemente los softwares mineros a utilizar en esta memoria.

2.5.1 Vulcan, Maptek

Vulcan, es uno de los tantos softwares que la empresa Maptek ofrece dentro de su catálogo de herramientas para la minería. En lo particular, Vulcan es un software minero con visualización 3D, el cual permite validar y transformar datos mineros a modelos dinámicos en tres dimensiones, ya sean para diseños de minas a cielo abierto como a nivel subterráneo.

Este software permite realizar trabajos como: la exploración y evaluación de recursos, diseño y desarrollo minero, operaciones mineras, optimización y programación y trabajos de cierre de mina (Maptek, 2015). Dentro de las herramientas de trabajo con las que cuenta Vulcan, está Pit Optimiser, el cual permite ayudar a determinar el diseño óptimo de la mina a través del algoritmo de Lerchs & Grossman.

A continuación, en la Figura 7 se presenta una visualización de un yacimiento a cielo abierto operativizado dentro del software Vulcan:

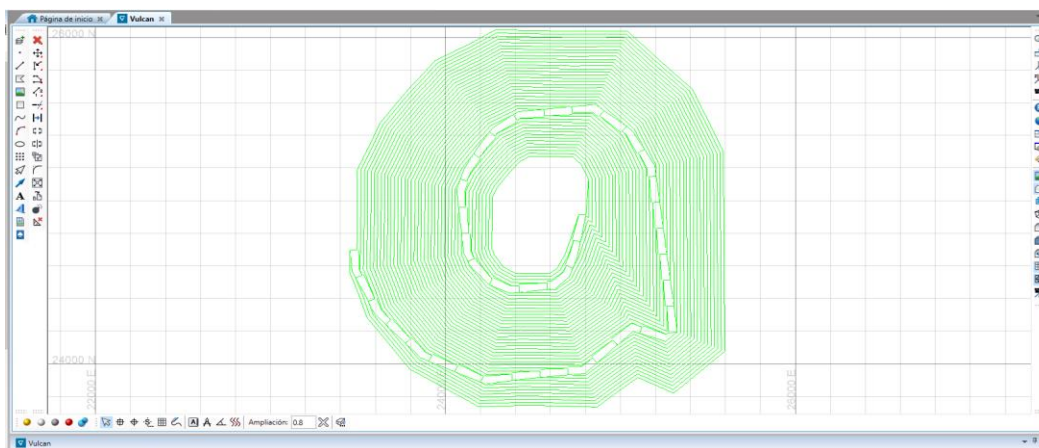


Figura 7. Yacimiento a cielo abierto operativizado en Vulcan

Fuente: Elaboración propia

2.5.2 Studio NPVS, Datamine

Uno de los productos de diseño y planificación minera para cielo abierto de la empresa Datamine es Studio NPVS. Este software cuenta con un sistema especializado de planificación estratégica para minas de cielo abierto, especialmente para la planificación de largo plazo. Studio NPVS cuenta con funciones que van desde el análisis de los datos, la optimización del yacimiento, generación de pits anidados y pushbacks, optimización de ley de corte, la programación de planes mineros y el análisis del transporte hasta gestión de los residuos (Datamine, 2020).

A continuación, en la Figura 8 se presenta una visualización de un modelo de bloques dentro del software Studio NPVS:

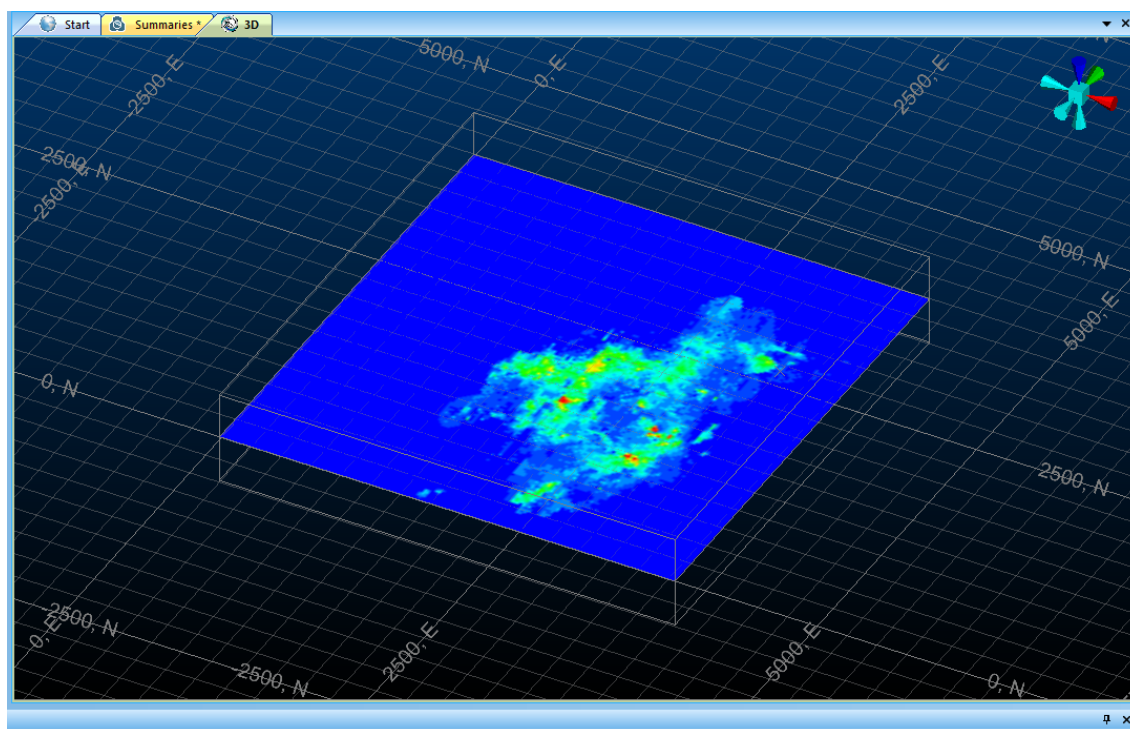


Figura 8. Modelo de bloques en Studio NPVS

Fuente: Elaboración propia

2.5.3 Doppler, Delphos.

Delphos Open Pit Planner, Doppler, es un software de planificación minera a cielo abierto desarrollado por el Laboratorio de Planificación Minera DELPHOS, cuyo principal objetivo es asistir al planificador en la toma de decisiones, en busca de la maximización del valor del negocio minero.

El software permite el manejo de modelos de bloques mediante herramientas de visualización y modificación de atributos. Además, incorpora el proceso de planificación estratégica

tradicional mediante cálculo de envolvente económica, pits anidados, selección de candidatos a fases de producción y obtención de planes mineros (DELPHOS, s.f.)

Respecto a los datos y la visualización, Doppler dispone de un motor de visualización de modelos en 3D, permitiendo al usuario observar diferentes vistas isométricas de su yacimiento, filtrando por leyes, tipo de roca, periodos o fases.

Adicionalmente, el software permite realizar planes de producción mediante el agendamiento directo de bloques, sin necesidad de usar pits anidados con la herramienta BOS2M. Por un lado, esta herramienta considera las restricciones de capacidad de extracción por periodos, y restricciones geometalúrgicas, tales como los rangos de leyes que van a planta, concentración de contaminantes, dureza, entre otros.

Por otro lado, BOS2M permite definir el mejor destino de cada bloque, dependiendo de su valor económico previamente calculado y ciertas restricciones indicadas, con el objetivo de definir un plan de producción que maximice el valor de los minerales, la recuperación de finos y minimizando costos u otros parámetros a elección del planificador.

A continuación, en la Figura 9 se presenta una visualización de perfil de los pushbacks generados en el software Doppler de un proyecto minero:

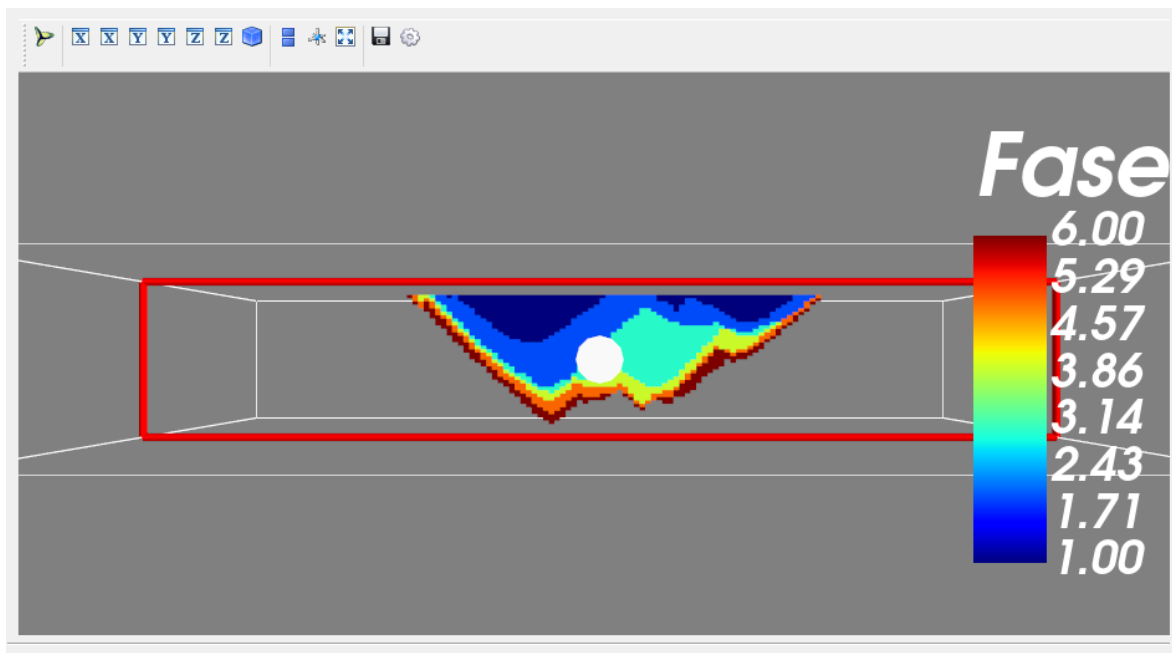


Figura 9. Vista de perfil de pushbacks generados en Doppler

Fuente: Elaboración propia

3 METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo para el caso de estudio A, seguirá las siguientes etapas y será aplicado de la misma forma para los 3 softwares, manteniendo todos los parámetros económicos y geométricos iguales:

1. Exploración y descripción del modelo de bloques a usar que represente el yacimiento.
 - i. Obtención de Curva Tonelaje-Ley.
 - ii. Obtención de histogramas de la distribución de leyes.
2. Obtención de Pits anidados y comparación de gráficos Pit by Pit.
 - i. Comparación numérica de las principales características de cada software respecto al primer y último pit.
 - ii. Comparación de análisis de sensibilidad en cada software al hacer variar el precio del metal de interés y manteniendo los demás parámetros constantes.
3. Definición de fases para cada software considerando tres escenarios diferentes: 3, 4 y 5 fases.
 - i. Comparación de tonelaje de estéril y mineral para cada escenario.
 - ii. Presentación de vistas isométricas de la expansión de fases.
4. Definición de un plan de producción, teniendo en cuenta una capacidad de tratamiento mina y de planta adecuada para el tamaño de la mina y una tasa de descuento.
 - i. Comparación de tonelajes de mineral y estéril obtenidos.
 - ii. Comparación de periodos y VAN obtenidos.
5. Comparación de: las características generales entregadas por cada software, la generación de los pit anidados y la envolvente económica final, la selección de fases y el plan de producción arrojado por cada software.
6. Generación de tabla resumen de ventajas y desventajas analizadas por cada software a partir de los resultados obtenidos.

Luego, de terminar el trabajo principal correspondiente al caso de estudio A, se procederá a realizar el análisis del caso de estudio B, manteniendo todos los parámetros económicos iguales, pero variando el ángulo de inclinación de las paredes del talud para todos los sectores de la mina. A continuación, se presentan las etapas a realizar en este segundo caso de estudio aplicado en cada software:

1. Obtención de Pits anidados.
 - i. Comparación numérica de las principales características de cada software respecto al primer y último pit.
2. Definición de fases para cada software, considerando solo un escenario de 3 fases.
 - i. Comparación de tonelaje de estéril y mineral en cada fase.
 - ii. Presentación de vistas isométricas de la expansión de sus fases.

3. Comparación de resultados obtenidos entre ambos casos de estudio aplicado para la obtención de pits y definición de fases.

A continuación, se presentarán las metodologías particulares para los tres softwares utilizados en el presente trabajo.

3.1 Metodología particular Vulcan

3.1.1 Parámetros de entrada o Inputs

Al iniciar cualquier trabajo en Vulcan, los primeros datos de entrada que solicita el software antes de cargar algún modelo de bloques, son las extensiones de las coordenadas mínimas y máximas del proyecto respecto a las direcciones Este, Norte y Elevación.

Ahora bien, el software permite la importación de modelos de bloques con variadas extensiones: Archivos de texto “.txt”, archivos de valores “.csv”, archivos ASCII, modelos de bloques exportados de Minesight, Easimine, Datamine y modelos de bloques propios de Vulcan “.bmf”. El formato que deben seguir todos los modelos de bloques que sean importados a Vulcan es el siguiente, en primer lugar, las coordenadas x, y, z del proyecto y luego todos los atributos, ya sean como: tonelaje, densidad, leyes de los productos de interés, unidades geológicas, recuperación, entre otros.

Además de permitir la importación de modelos de bloques, el software permite la importación de diferentes archivos de diseño como: superficies, triangulaciones, sólidos, archivos CAD (dwg, dxf, dxb), entre otros.

Una vez importado el modelo de bloques, el software permite la manipulación de las variables que existan en él, ya sea para agregar, eliminar o editar mediante códigos Python; generar estadísticas generales, histogramas, gráficos de cajas, para cada variable.

Para poder visualizar alguna variable como un modelo dinámico en 2D y 3D, Vulcan permite una visualización con una leyenda generada automática o una leyenda previamente generada por el usuario.

3.1.2 Pit Optimiser

Pit Optimiser es una herramienta de Vulcan en donde se genera toda la metodología tradicional de la planificación a largo plazo, generando un plan de producción preliminar del proyecto. El principal objetivo de esta herramienta es generar una instancia de pits anidados a partir de una optimización del Pit, en base a una evaluación económica.

La interfaz general del Pit Optimiser se subdivide en tres secciones:

3.1.2.1 Financials

Esta sección contiene los apartados para ingresar todos los parámetros necesarios para poder determinar la valorización de cada bloque, donde dentro de estos parámetros que se pueden añadir están: el precio del mineral, el costo mina, costos de refinación y ventas, costo planta, contaminantes que dañen el proyecto, recuperación, leyes de los minerales de interés.

Lo primero que se consulta en esta sección y que arrastra toda la optimización más adelante, es la manera en la que se calculará el valor económico de los bloques, donde el software entrega dos opciones. La primera opción es usar solo un producto, un tipo de procesamiento y un tipo de unidad geológica. Si se selecciona esta opción el software no permitirá más adelante añadir capacidad de procesamiento a planta, pero sí de capacidad de extracción mina. La segunda opción es utilizar múltiples productos, tipos de procesamiento de minerales y diferentes unidades geológicas.

También, se puede seleccionar el criterio para definir si un bloque es llevado a planta o no. Para esto, hay dos opciones, la primera es el criterio “By Cutoff”, la cual indica que si un bloque al ser valorizado, su valor es mayor que el costo de rehabilitación, este será procesado, por el contrario, si es menor su valor, este será considerado como estéril. El segundo caso es “By Revenue”, esta opción indica que un bloque debe tener un valor mayor al costo de un bloque cuando es considerado como estéril.

Para la valorización de los bloques, esta será calculada a través de la siguiente ecuación (Castro, 2022):

$$B_v = [R \cdot Lm \cdot T_b \cdot (RF \cdot P - Cryv) - T_b \cdot (Cm + Cp)] \quad (3)$$

Donde:

B_v = Beneficio del bloque.

R = Recuperación metalúrgica.

Lm = Ley media del bloque.

T_b = Tonelaje de bloque.

RF = Revenue Factor.

P = Precio de venta del mineral.

$Cryv$ = Costo de refinación y ventas.

Cm = Costo mina.

Cp = Costo planta o de procesamiento.

3.1.2.2 Optimisation

Esta sección tiene como objetivo definir los pits anidados, entregando visualizaciones de cada pit y sus características de interés. Para esto, la herramienta ofrece dos algoritmos para resolver el problema de la optimización, el algoritmo de Lerchs & Grossman al activar la opción de “Legacy Engine” y el algoritmo por defecto Push-Relabel.

Para definir esta instancia de optimización, se tienen que analizar tres restricciones. La primera restricción es la definición de cómo los bloques de aire presentes en el modelo de bloques serán tratados durante la optimización y el análisis. Para esto, existen tres diferentes maneras para considerar el aire:

1. **Todos:** esta es la opción predeterminada del software y considera todo el aire dentro del modelo de bloques y se recomienda utilizar para superficies topográficas irregulares.
2. **Solo aquellos que sean necesarios:** esta opción considera solo bloques que podrían generar un impacto en la forma geométrica del pit, omitiendo todos los bloques de aire innecesarios.
3. **Solo en túneles:** considera que solo hay aire en cuevas y túneles. Esta opción se recomienda para superficies topográficas planas.

La segunda restricción es la definición de las subregiones espaciales con diferentes requisitos de estabilidad de taludes. Principalmente, se añaden los buzamientos y pendientes de las paredes para todo el rajo. El software permite generar diferentes subregiones con diferentes datos del pit a nivel general a partir de triangulaciones o polígonos que así lo definan.

La última restricción es la selección de parámetros para definir cómo se generarán los pits anidados o los estudios de análisis de sensibilidad serán realizados. Para esto, existen dos maneras, mediante disminución de los valores económicos de un bloque de mineral o el uso de los Revenue Factors, incorporando como información el valor mínimo, máximo y el incremento de cada RF a utilizar en la optimización.

3.1.2.3 Analysis

Esta tercera sección es la encargada de compilar toda la información obtenida en las secciones anteriores para poder generar fases y un plan de producción preliminar. Dentro de esta sección se puede definir si como resultado se quiere recibir un secuenciamiento de bloques por Best y/o Worst Case.

Para poder definir el secuenciamiento de bloques a lo largo de los periodos del proyecto, se definen las capacidades de tratamiento mina y de planta, las tasas de descuento, inversiones iniciales.

Por último, se tienen que seleccionar qué reportes y gráficos se desean generar de toda la información registrada y los parámetros a reportar. Dentro de los gráficos que se entregan son los Pit by Pit, Period by Period y un gráfico a elección donde el planificador define su propio gráfico.

3.1.3 Definición de Fases y Plan de producción

Ahora bien, una vez realizada la rutina del Pit Optimiser, para poder definir las fases del proyecto es necesario generar un gráfico Pit by Pit para poder observar la distribución del tonelaje de mineral y de estéril por cada pit anidado.

Vulcan no ofrece una opción automática de definición de pit final ni de selección de pushbacks, por lo cual la metodología es solamente manual e iterativa, puesto que una vez seleccionados los pits donde terminará cada fase por parte del planificador, hay que volver al Pit Optimiser a la sección de Analysis y habrá una instancia para indicar el pit final y a qué número de pit anidado corresponde el final de cada fase.

Una vez seleccionada la información de las fases, es necesario indicarle al software que genere los gráficos Pit by Pit, Period by Period para poder observar el plan de producción a lo largo de los años para las fases seleccionadas.

3.2 Metodología particular Doppler

3.2.1 Parámetros de entrada o Inputs

Este software solo permite la importación de modelos de bloques con la extensión “.txt” (Archivos de textos). Donde el modelo de bloques tiene que seguir el siguiente formato (Rodríguez & Mancilla, s. f.):

- La primera fila debe contener los nombres de cada parámetro de información a utilizar en el proyecto.
- Las primeras 3 columnas deben contener las coordenadas x, y, z de cada bloque. A partir de la cuarta columna, se reciben los atributos del proyecto, ya sean parámetros como ley del mineral, densidad, tonelaje, litología, entre otros.
- Dentro del archivo de texto, cada columna debe estar separada mediante tabulación o espacio, de lo contrario, el software no leerá el modelo de bloques. Además, cada dato debe ser del tipo numérico y no de texto.

Para importar el modelo de bloques, es necesario crear una carpeta nueva donde se realizará todo el proyecto y donde se irá guardando y generando la información nueva. Una vez realizada la correcta importación del proyecto, el software permite agregar o quitar columnas mediante herramientas presentes en su menú. Esto, a través de fórmulas que pueden ser generadas por una combinación de otras columnas ya presentes en el modelo de bloques o expresiones condicionales. Para esto último, el programa trabaja a partir de números binarios, donde es 1 si la expresión es verdadera o 0 si es que es falsa.

Otras herramientas presentes en el software que se pueden utilizar apenas se carga el modelo de bloques, es la generación de las estadísticas generales de cada columna y su visualización en 2D y 3D, con una leyenda predeterminada del software, y la generación de histogramas y de las curvas de tonelaje-ley que necesitan como parámetro de entrada los datos de las leyes del mineral de interés y el tonelaje.

3.2.2 Precedencias del software

Dentro del menú de herramientas del software, se pueden generar las precedencias que se necesitan para empezar el cálculo de pits y agendamientos. El primer parámetro que solicita el programa es la distancia vertical. Esta se refiere a la distancia entre los bloques donde se calcularán las precedencias.

El segundo parámetro se refiere a la asignación de las unidades geológicas presentes en el modelo de bloques. Para esto, el software permite ir añadiendo específicamente cada unidad geológica o si no se quiere diferenciar tipos de rocas, se pueden añadir mediante la opción “All”.

El tercer parámetro se refiere a los ángulos de talud a generar dentro del yacimiento, donde se solicitan los bearings o azimuts (ángulos entre 0° a 360°) y los slopes o pendientes (ángulos entre 0° y 90°). Respecto a los buzamientos, estos se miden desde el norte en sentido horario y se deben escribir de manera complementaria, es decir, tiene que cumplirse que la suma de los ángulos sea de 360°. Por ejemplo, si se quiere que los primeros 90° del pit tengan un slope de 45°, los siguientes 150° tengan un slope y 40° y los últimos 120° tengan un slope de 45°, se deben escribir de la siguiente manera mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo de definición de bearings y slopes en Doppler

Bearing	Slope
90°	45°
150°	40°
120°	45°

3.2.3 Generación de Pits anidados

Para empezar a generar los pits anidados del yacimiento, el software ofrece dos maneras para realizar el cálculo de esta instancia. La primera manera es a través de la computación de parámetros económicos y una variación de los RF. La segunda manera es a través de una selección de pits anidados ya calculados previamente a partir de una columna de datos.

Para la primera opción de generación de pits anidados, el software solicita ingresar datos de: costo mina para la extracción, el tonelaje por bloque, el set de precedencias del proyecto, el valor mínimo, máximo y el incremento del RF.

Luego, Doppler necesita información de diferentes parámetros para obtener una valorización de cada bloque en el pit. Dentro de estos parámetros se tiene que ingresar el precio del mineral de interés, el factor de conversión de unidades, la recuperación, el costo de refinación y ventas, el costo de procesamiento o planta y la ley del mineral. El software utiliza la siguiente fórmula para la valorización de los bloques:

$$B_D = \text{máx}\{(0.01 \cdot R \cdot L_m \cdot T_B \cdot F \cdot (RF \cdot P - Cryv) - T_B \cdot (C_m + C_p)\}; (-C_m \cdot T_B)\} \quad (4)$$

Donde:

B_D = Beneficio del bloque en Doppler.

R = Recuperación metalúrgica.

L_m = Ley media del bloque.

T_B = Tonelaje de bloque.

F = Factor de conversión de unidades.

RF = Revenue Factor.

P = Precio de venta del mineral.

C_{ryv} = Costo de refinación y ventas.

C_m = Costo mina.

C_p = Costo planta o de procesamiento.

Una vez calculada la instancia de pits anidados, el software permitirá una visualización de los pits y entregará una columna de datos que corresponde a un indicador de estéril mediante un código binario, asignándole un 1 al material detectado como estéril y un 0 a lo detectado como mineral.

3.2.4 Definición de Fases

Luego de ya haber definido los pits anidados en el software, DOPPLER permite generar una instancia de selección de fases o pushbacks. Para esto, el software dispone de dos opciones:

- **Selección Manual:** se despliega el listado de todos los Revenue Factors indicados por el usuario según la instancia anterior de la generación de pits anidados, donde cada RF está asociado a un número de pit. Dicho esto, se deben seleccionar los RF y cada uno representará un subconjunto de pits, dando paso al fin de cada fase.
- **Selección Automática:** se le debe ingresar al software como input el número de pushbacks a calcular, luego a través de un algoritmo, se entregará una columna con las fases indicadas. Cabe destacar que este algoritmo trata de dejar de la mejor manera posible el tonelaje total repartido uniformemente entre las fases.

3.2.5 Plan de producción

A partir de la información entregada por la instancia de generación de pushbacks, se procede a generar el plan de producción del proyecto. Para esto, el software dispone de 3 opciones para el agendamiento del material:

1. **Agendamiento Best/Worst Case por bancos:** este tipo de agendamiento entrega como resultado la cantidad de material a extraer de cada banco por cada periodo. Dentro de esta herramienta se consulta si se quiere realizar el agendamiento por Best Case o Worst Case. Si se selecciona la primera opción el agendamiento de los bloques será pit a pit, en caso contrario, el agendamiento será banco a banco.
2. **Agendamiento Best/Worst Case por bloques:** este tipo de agendamiento entrega como resultado el periodo de extracción de cada bloque de manera entera a diferencia

del método anterior. De manera análoga al método anterior, la herramienta consulta si se quiere realizar el agendamiento por “By Pit and Bench” haciendo referencia al Best Case, o “By Bench” refiriéndose al Worst Case.

3. **Agendamiento Fase-Banco:** esta herramienta permite realizar el agendamiento de los bloques a través de variadas restricciones de precedencia entre bancos y fases, entregando como resultado columnas con la cantidad de periodos del proceso, donde cada dato de esta columna corresponde al porcentaje de extracción del bloque en dichos periodos.

La primera restricción es la cantidad de actividades por banco. Para esto se tienen dos opciones: la primera es a través de una actividad por banco, es decir, extrae todo el material del banco sin diferenciar entre estéril y mineral. La segunda opción es dos actividades por banco, al contrario del caso anterior, aquí el software discrimina lo que es estéril y lo que es mineral, preguntando además si se quiere extraer primero el estéril y luego el mineral o viceversa.

La segunda restricción es de las capacidades por periodo, aquí se debe ingresar la capacidad máxima de movimiento mina, la capacidad máxima de movimiento planta y la tasa de descuento que se va a aplicar al proyecto. El software permite realizar esta restricción con una capacidad fija para todos los periodos o capacidades variables por periodos.

Por último, la restricción de precedencia de bancos entre fases a través del “Min/Max Lead”. El Min Lead corresponde al número mínimo de bancos que se deben extraer en una fase antes de que la siguiente fase inicie sus operaciones. El Max Lead corresponde a la diferencia máxima de bancos que pueden tener dos fases que estén operando en un mismo periodo.

3.3 Metodología particular Studio NPVS

3.3.1 Parámetros de entrada o Inputs

Los modelos de bloque que se pueden importar a este software pueden ser de variadas extensiones, estas van desde archivos de texto, modelos de bloques de: Datamine “.dm”, Vulcan “.bmf”, Minesight “.dat”, entre otros.

Lo que solicita este software en cada modelo de bloques para su correcto funcionamiento es que contenga como mínimo las coordenadas espaciales x, y, z de cada bloque, el producto de interés, la densidad y los tipos de rocas. Adicionalmente se pueden añadir diferentes tipos de atributos que contribuyan a cada proyecto.

Una particularidad que tiene Studio NPVS para la planificación de largo plazo, es que si la variable densidad tiene valores iguales a cero dentro del modelo importado, estos bloques no son considerados por el software y son eliminados para el proceso de optimización. También,

el software elimina aquellos bloques que queden fuera de los límites del proyecto, por lo cual, definir el origen, el tamaño y la cantidad de bloques por cada coordenada es de suma importancia antes de correr la rutina de la planificación de largo plazo.

3.3.2 Modelo económico

Luego de importar el modelo de bloques, este es el primer apartado para la optimización de una planificación minera de largo plazo en el software. En esta sección se le solicita ingresar al usuario los parámetros económicos asociados al proyecto como lo son: el precio del producto de interés, el costo de refinación y ventas, costo mina, costo planta y la recuperación.

Además de ingresar todos los parámetros económicos, Studio NPVS dispone de un apartado para definir cómo se discretizará cada bloque para definirlo como estéril o como mineral. Para esto, se tienen cinco opciones:

1. Se considerará como mineral si el beneficio de la parcela es mayor que el costo de rehabilitación, de lo contrario se considerará como estéril.
2. El bloque se asignará como mineral si la sumatoria de sus leyes dividida en los límites económicos dado por la ley de corte es mayor que 1.
3. La parcela será considerada como mineral si las leyes de todos sus productos son mayores que su ley de corte.
4. La parcela es mineral si la ley de al menos uno de sus productos es mayor que su ley de corte.
5. Al momento de verificar las unidades geológicas importadas al software, si esta es asignada como mineral, cualquier parcela dentro de esa tipología será considerada como mineral, de lo contrario será estéril.

Donde se define el término de parcela como una fracción del bloque, el cual tiene asignadas variables como el tipo de roca, tonelaje y la ley de los productos de interés (Castro, 2022).

En cuanto a la valorización del bloque, Studio NPVS no especifica ni en su manual ni en el mismo software cómo lleva a cabo dicha actividad. Sin embargo, Castro (2022) a través de simulaciones de cálculo dentro del software determinó una fórmula tentativa para la valorización de cada bloque, la cual está denotada de la siguiente manera:

$$B_S = \text{máx}\{(R \cdot L_m \cdot T_B \cdot F \cdot RF \cdot (P - Cryv) - T_B \cdot (C_m + C_p)\}; (-C_m \cdot T_B)\} \quad (5)$$

Donde:

B_S = Beneficio del bloque en Studio NPVS.

R = Recuperación metalúrgica.

L_m = Ley media del bloque.

T_B = Tonelaje de bloque.

F = Factor de conversión de unidades.

RF = Revenue Factor.

P = Precio de venta del mineral.

C_{ryv} = Costo de refinación y ventas.

C_m = Costo mina.

C_p = Costo planta o de procesamiento.

3.3.3 Generación de Pits anidados

En esta etapa, el software lo primero que hace es determinar el algoritmo por el cual se determinará el pit final. Para esto, se disponen de dos algoritmos, el primero es el algoritmo de Lerchs & Grossman, el cual tiene como objetivo maximizar el beneficio del pit, mientras que el otro algoritmo busca maximizar los recursos. A partir de la selección del algoritmo, el software solicita colocar el RF máximo junto a su incremento para los cuales se crearán los pits anidados. Cabe destacar que el software no permite colocar un RF mínimo.

Adicionalmente, el software permite seleccionar la función objetivo del secuenciamiento de los pits anidados, esta puede ser optimizar el VAN o la mezcla.

Por último, se deben seleccionar las restricciones de los ángulos del talud del yacimiento. Para esto, se deben agregar los azimuth con un rango de 0° a 359° y un slope o pendiente del talud con un rango de 0° a 90° .

Una vez terminada la instancia de pits anidados, el software permite la visualización de estos y genera un reporte de un resumen de los tonelajes de cada envolvente, junto a su beneficio y leyes de los productos de interés.

3.3.4 Definición de Fases

Para la definición de fases, Studio NPVS permite generarlas a partir de algún pit anidado previamente calculado o a partir de una serie de expansiones que se rigen a ciertos criterios. Estos criterios se consultan al usuario independientemente de qué método que se seleccione.

Los primeros criterios son la cantidad de fases que se quieren generar y el ancho mínimo de operación que debe existir entre los límites de una fase a otra en la parte más profunda de cada fase. Posteriormente, mediante iteraciones de prueba y error el software permite variar la cantidad de roca total, estéril o de mineral a extraer por cada fase, indicando la profundidad de cada una a nivel de bancos.

Terminado el proceso de definición de fases, el software permite la visualización de estas, como también el reporte que presenta un resumen fase por fase respecto a su beneficio, tonelaje y leyes del producto de interés.

3.3.5 Generación del Plan de producción

Para esta etapa, la generación del plan minero en este software está basado en un sistema de árbol de decisiones que tienen como objetivo definir los mejores agendamientos de material a partir de diferentes iteraciones que hacen referencia a cada rama de dicho árbol.

Para llevar a cabo los agendamientos, el software permite ingresar las capacidades tanto de mina como de planta como la tasa de descuento para que se lleven a cabo. Adicionalmente, el software permite ingresar restricciones respecto a las fases previamente calculadas, estos criterios son los siguientes:

1. Max Sink Rate: indica la máxima cantidad de bancos que pueden estar en producción por cada fase activa en un periodo.
2. Max Tonnage: indica la máxima cantidad de tonelaje que puede ser extraída por cada fase en un periodo.
3. Start After: restringe las operaciones de cierta fase hasta un determinado periodo.

Una vez finalizado el proceso de generación del plan de producción, el software reporta un resumen periodo a periodo de la cantidad de material que se extraerá, indicando consigo, el beneficio, las leyes de los productos de interés y la razón estéril mineral por cada periodo.

4 RESULTADOS CASO DE ESTUDIO A

4.1 Características Generales

Este caso de estudio corresponde a un yacimiento minero ubicado en un punto ficticio en el norte de Chile, el cual está representado a través de un modelo de bloques que contiene al cobre tipo óxido como principal producto de interés dividida en 12 unidades geológicas diferentes. A continuación, en la Tabla 2 se presentan las características básicas del modelo de bloques.

Tabla 2. Características del modelo de bloques

Número de bloques	1.272.960
Tamaño de los bloques	25 (m) x 25 (m) x 15 (m)
Tonelaje Total (Mt)	34,050

Ahora, respecto a la relación entre la cantidad de material existente dentro del yacimiento y la concentración de leyes de cobre del modelo de bloques, esta se representa en la siguiente curva tonelaje ley:

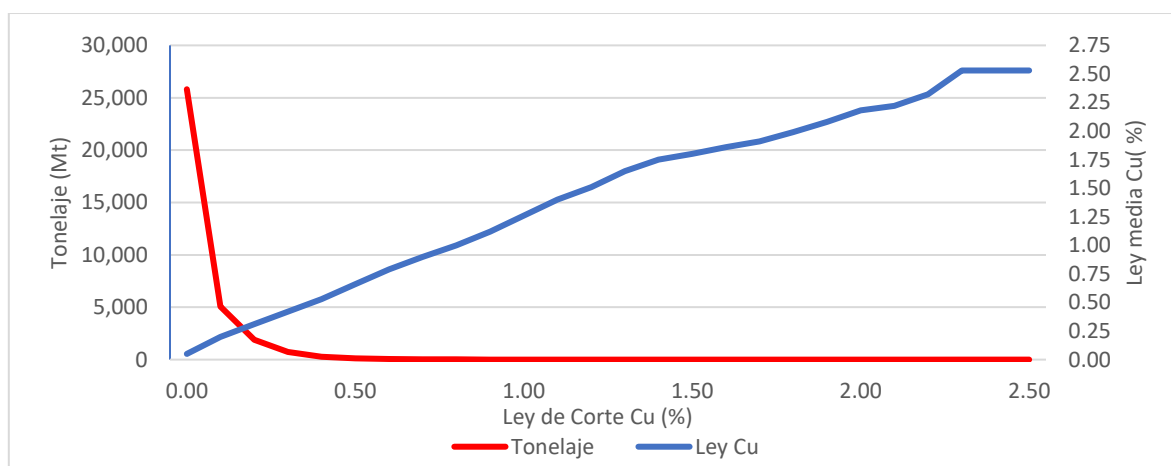


Figura 10. Curva tonelaje ley del modelo de bloques

En la Tabla 3 se adjuntan las estadísticas generales de la ley del mineral de interés y la densidad del modelo de bloques.

Tabla 3. Estadísticas básicas de la ley de cobre y la densidad

	Ley de Cobre (%)	Densidad (t/m ³)
Mínimo	0.00	0.00
Máximo	2.53	2.64
Promedio	0.04	2.16
Desviación Estándar	0.09	0.97

A través de la variable CUT del modelo de bloques se realizó el siguiente histograma para verificar la distribución de la ley de cobre.

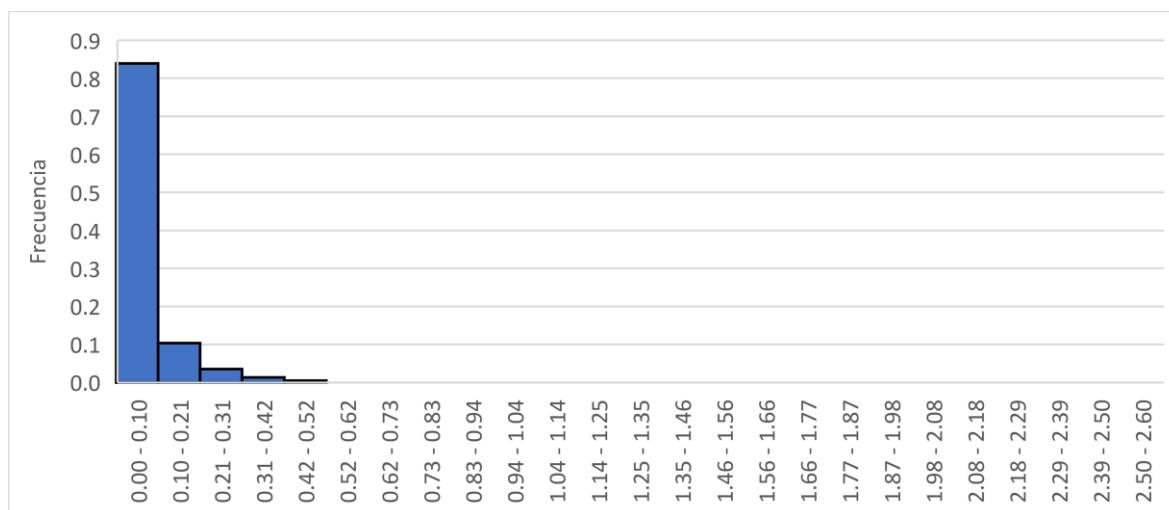


Figura 11. Histograma de Ley de Cu del modelo de bloques

Como se mencionó anteriormente, el modelo de bloques cuenta con 12 unidades geológicas clasificadas por la variable LITO que las enumera del 1 al 12. En la Tabla 4 se presenta una estadística del cobre contenido por cada unidad geológica.

Tabla 4. Estadísticas de la Ley de Cu por cada unidad geológica

Unidad geológica	Ley de Cu Contenido		
	Mínimo %	Máximo %	Promedio %
R1	0.000	0.965	0.025
R2	0.000	0.241	0.003
R3	0.000	0.591	0.003
R4 (Aire)	0.000	0.000	0.000
R5	0.000	2.204	0.063
R6	0.000	1.868	0.241
R7	0.000	1.814	0.111
R8	0.000	0.711	0.196
R9	0.000	1.071	0.228
R10	0.000	1.541	0.323
R11	0.069	1.053	0.407
R12	0.000	2.533	0.228

4.2 Pits Anidados y Pit Final

Siguiendo la metodología de cada software, se procede a definir los pits anidados del yacimiento y luego a la selección del pit final, manteniendo constante en los tres softwares cualquier parámetro de entrada que indique su metodología.

Por otro lado, para términos prácticos, se mantendrá un ritmo de producción mina y un ritmo planta de 40 Mt/año y 20 Mt/año respectivamente. Ahora respecto a la configuración de los parámetros utilizados para la valorización de los bloques en todos los softwares, estos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros económicos y geomecánicos

Parámetro	Valor	Unidad
Costo Mina	2.5	USD/T
Costo planta	11.0	USD/T
Precio Cobre	2.8	USD/lb
Costo Refinación y ventas	0.5	USD/lb
Recuperación	90	%
Tasa de descuento	10	%
RF Mínimo	0.00	-
RF Máximo	1.00	-
Incremento del RF	0.01	-

Además de estos parámetros, para este caso de estudio se considera un ángulo de talud para todas las paredes del yacimiento de 45° y no se añadirá dilución de material como parámetro en los cálculos.

4.2.1 Vulcan

Como se mencionó en la metodología del software, Vulcan utiliza dos métodos para valorizar los bloques, los cuales fueron utilizados en este proyecto para verificar sus diferencias al momento de generar los pits anidados.

Ambos métodos “By Cutoff” y “By Revenue” arrojaron 58 pits anidados. De estos, desde el Pit 1 hasta el Pit 4 entregaron la misma información respecto a beneficios y tonelajes de mineral y estéril, luego a partir del Pit 5 se generaron diferencias hasta el final. En las Figuras 12 y 13 se presentan los gráficos Pit by Pit realizados por cada método.

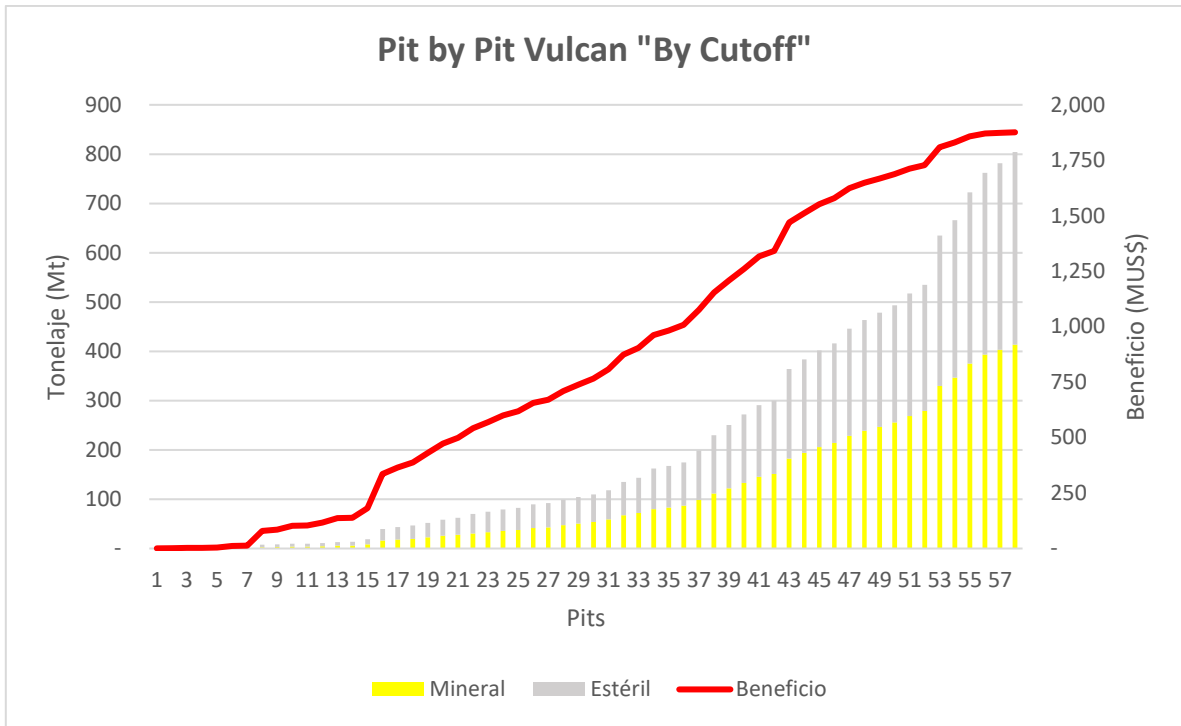


Figura 12. Gráfico Pit by Pit obtenido por el método "By Cutoff", Vulcan

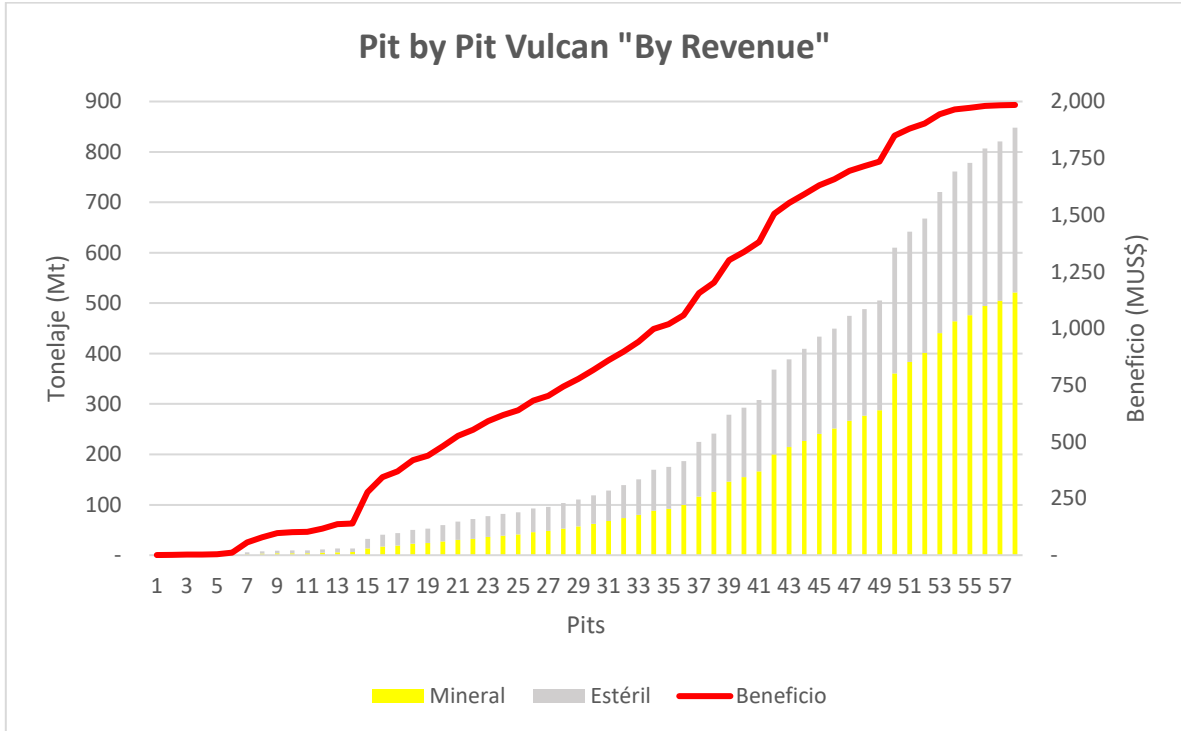


Figura 13. Gráfico Pit by Pit obtenido por el método "By Revenue", Vulcan

De los gráficos adjuntos se observa que para el método de valorización de bloques de Vulcan “By Revenue”, la curva de beneficio alcanza una estabilización para pits inferiores que el método “By Cutoff”, lo que podría indicar a priori que se pueden alcanzar mayores beneficios y a un menor tiempo con dicho método.

4.2.2 Doppler

Respecto a Doppler y a diferencia de Vulcan, este software tiene un solo procedimiento para valorizar sus bloques y generar sus pits anidados. En la Figura 14 se presenta el gráfico Pit by Pit entregado por el software.

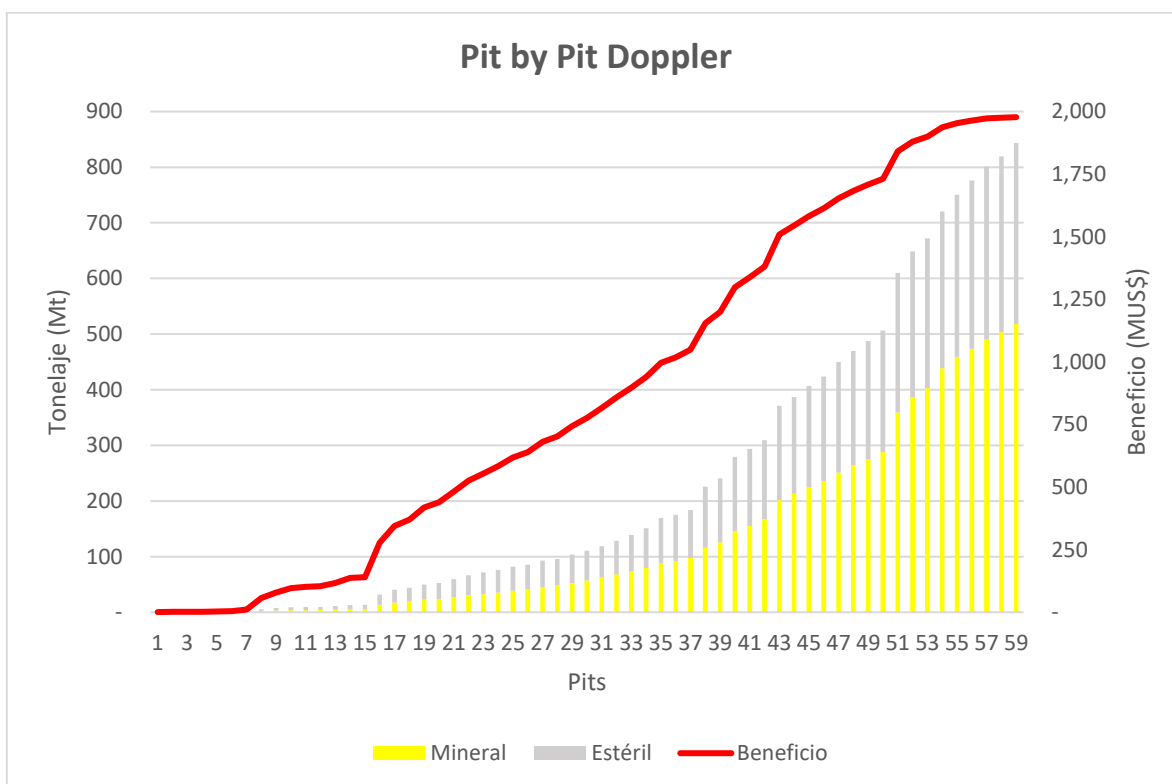


Figura 14. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler

4.2.3 Studio NPVS

Este software al momento de realizar la valorización de bloques tiene 5 métodos para llevar la tarea a cabo. Sin embargo, tras varias pruebas de corridas por cada método, se observó que para todos los métodos indicados en la metodología de este software, se generan los mismos resultados respecto a cantidad de pits anidados generados, tonelajes y beneficios por pits.

Es por ello que se decide trabajar con el primer método que entrega el software por defecto. En la Figura 15 se presenta el gráfico Pit by Pit generado por este software.

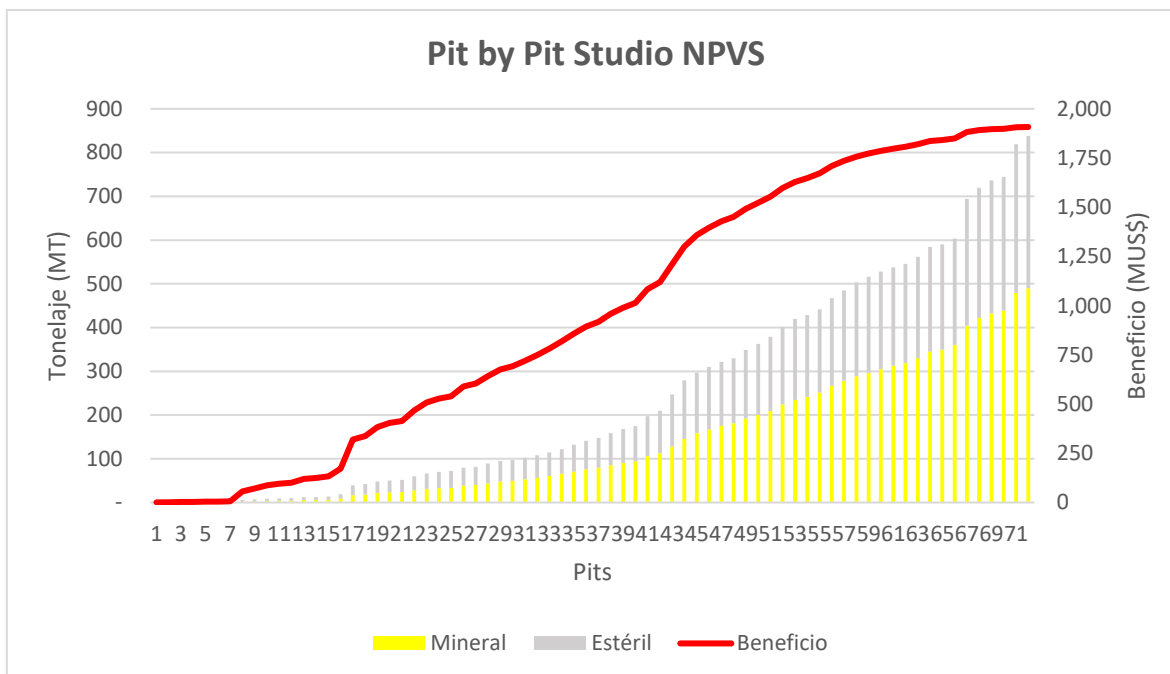


Figura 15. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS

4.2.4 Comparaciones Pit inicial y Pit final

En la Tabla 6 se presenta un resumen con las principales características entregadas por cada software respecto al primer pit.

Tabla 6. Comparación de características del primer Pit por cada software

PRIMER PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Vulcan By Cutoff	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Vulcan By Revenue	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Doppler	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Studio NPVS	0.27	0.024	0.024	0.000	0.729	1.020

De la información entregada por la tabla, se observa que los 3 softwares entregan los mismos resultados en cuanto al tonelaje de roca total, de mineral y de estéril y la ley de cobre. Sin embargo, el software Studio NPVS es el único que entrega información diferente respecto a los Revenue Factors y el beneficio que le asigna al primer pit. Lo anterior se puede deber a que este software al momento de valorizar los bloques, el RF es un multiplicador de la diferencia entre el precio del producto de interés con su costo de refinación y ventas, mientras que para Vulcan y Doppler, el RF solo es un multiplicador del precio.

Cabe destacar, que el único software que no asocia el primer pit con el primer RF reportado es el software Doppler, el cual para este proyecto entregó 42 pits sin información, arrancando la información a partir pit 43 con un RF de 0.42, que se asumió como el primer pit.

De la misma manera, la Tabla 7 presenta un resumen de las principales características entregadas por cada software respecto al último pit.

Tabla 7. Comparación de características del último Pit por cada software

ÚLTIMO PIT	PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Vulcan By Cutoff	58	1.00	804.320	413.468	390.851	1,876.213	0.447
Vulcan By Revenue	58	1.00	848.378	521.004	327.374	1,984.898	0.414
Doppler	59	1.00	843.366	518.037	325.329	1,977.415	0.414
Studio NPVS	72	1.00	838.530	489.936	348.594	1,907.626	0.404

Respecto a información aportada por esta última tabla, por un lado, se puede observar que los softwares que generan los resultados más similares respecto a cada característica son Studio NPVS, Doppler y Vulcan con su método “By Revenue” donde su principal diferencia yace en la cantidad de roca total para un RF de 1, puesto que para estos últimos dos, la cantidad de mineral corresponde al 61% del material total, mientras que para Studio NPVS es un 58%.

Por otro lado, comparando ambos métodos generados por Vulcan, el método “By Cutoff” a pesar de que indica que se extrae una menor cantidad de material total, la cantidad de mineral corresponde a un 51% de esta última, versus a un 61% proporcionado por el método “By Revenue”, lo cual puede explicar la diferencia en cuanto al beneficio esperado al último pit, a pesar de que el primer método tiene una mayor ley de cobre.

Ahora, dejando de lado el método “By Cutoff” de Vulcan, el software Studio NPVS fue el programa que arrojó menores valores en cuanto a la roca total, mineral y beneficio esperado. A pesar de que está cerca de los tonelajes respecto a Vulcan y Doppler con una diferencia en promedio de un 0.9% con relación a la cantidad de roca total y un 3.7% al beneficio.

4.2.5 Análisis de sensibilidad mediante variación del precio mineral de interés

En todos los softwares se realizó una prueba de sensibilidad de resultados al variar el precio del cobre con el objetivo de verificar qué software tiene una mayor variabilidad al cambiar un parámetro en su metodología normal. Para esto, se mantuvieron constantes los parámetros económicos y geométricos en los tres softwares y el precio del metal de interés se varió en un $\pm 1\%$, $\pm 3\%$ y $\pm 5\%$.

Los resultados de estas variaciones se presentan en la Tabla 8 donde solo se comparan con la cantidad de roca total y mineral a extraer respecto al pit reportado con un RF igual a 1.00 en cada software.

Tabla 8. Resultados del análisis de sensibilidad del precio obtenidos en cada software

Software	Variabilidad %	-5%	-3%	-1%	Precio Base	+1%	+3%	+5%
	Precio (US\$/lb)	2.66	2.72	2.77	2.80	2.83	2.88	2.94
Vulcan "By Cutoff"	Roca Total (Mt)	634.56	728.86	776.94	804.32	822.84	868.62	931.88
	Mineral (Mt)	310.65	363.63	395.48	413.47	428.81	459.82	502.20
Vulcan "By Revenue"	Roca Total (Mt)	720.48	782.67	820.64	848.37	900.17	936.90	1,043.45
	Mineral (Mt)	423.57	469.71	500.57	521.00	558.40	589.86	663.26
Doppler	Roca Total (Mt)	720.32	781.70	819.22	843.37	901.51	936.17	1,039.40
	Mineral (Mt)	421.95	467.14	499.11	518.04	557.59	589.76	659.33
Studio NPVS	Roca Total (Mt)	603.18	727.43	812.89	838.53	860.87	946.02	1,023.99
	Mineral (Mt)	354.64	421.60	472.63	489.94	509.61	567.91	619.58

De la tabla, se observa que el software que tuvo una mayor variabilidad al disminuir el precio del cobre fue el software Studio NPVS con una disminución del 28.07% y un 27.62% respecto a la roca total y el mineral respectivamente, mientras que los softwares que tuvieron una mayor variabilidad al aumentar el precio del cobre, respecto a la roca total, fue Doppler con un aumento del 23.24%, y Vulcan mediante el método "By Revenue" con un 27.31% respectivamente.

Por otro lado, se determinó que el software más sensible a una variación del precio fue Studio NPVS, debido a que posee el mayor rango de dispersión al aplicar una variación de un $\pm 5\%$, tanto como para el tonelaje de roca total como el de mineral. La diferencia porcentual respecto a los valores originales por cada software se puede encontrar en el Anexo A.

4.3 Fases

4.3.1 Vulcan

Como se mencionó en la metodología de este software, Vulcan no permite una selección automática de fases, sino que el usuario tiene que ingresar manualmente las fases mediante criterios propios. Teniendo lo anterior en consideración, se definieron tres escenarios: 3, 4 y 5 fases teniendo como función objetivo mantener tonelajes de extracción similares por cada fase.

A continuación, en las Figuras 16, 17 y 18 se presentan los resultados obtenidos de los tonelajes de estéril y mineral para cada escenario y para los ambos métodos de valorización de bloques con los que cuenta Vulcan.

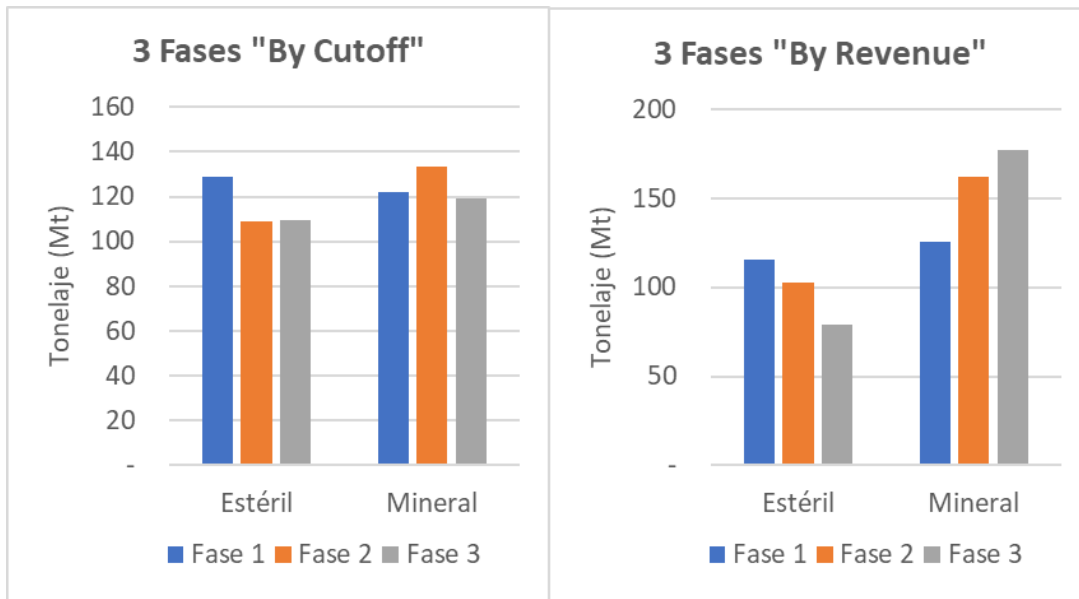


Figura 16. Gráficos de toneladas de estéril y mineral para el escenario de 3 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan

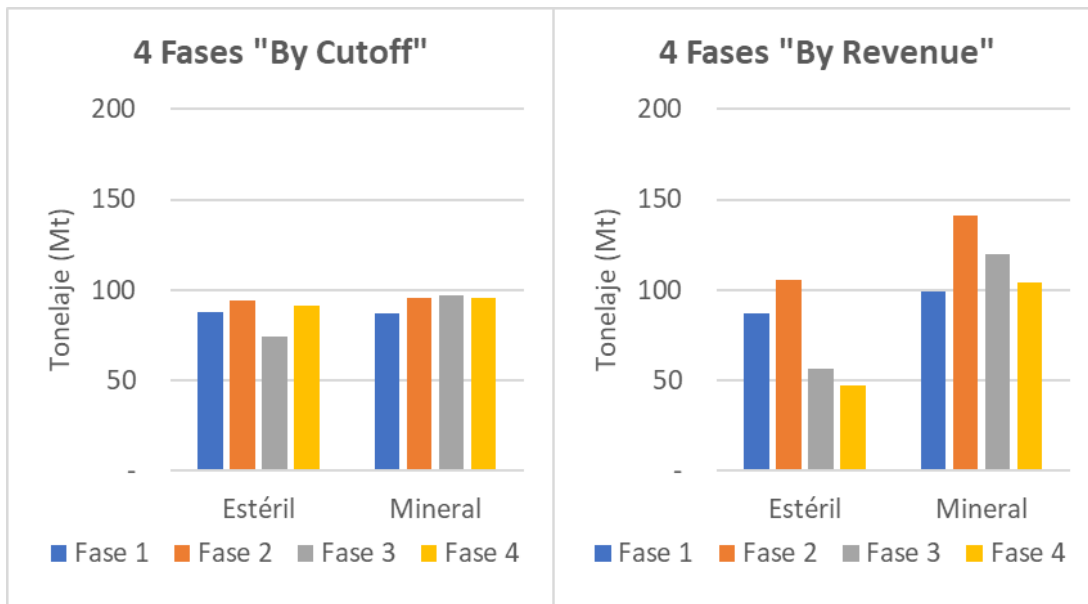


Figura 17. Gráficos de toneladas de estéril y mineral para el escenario de 4 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan

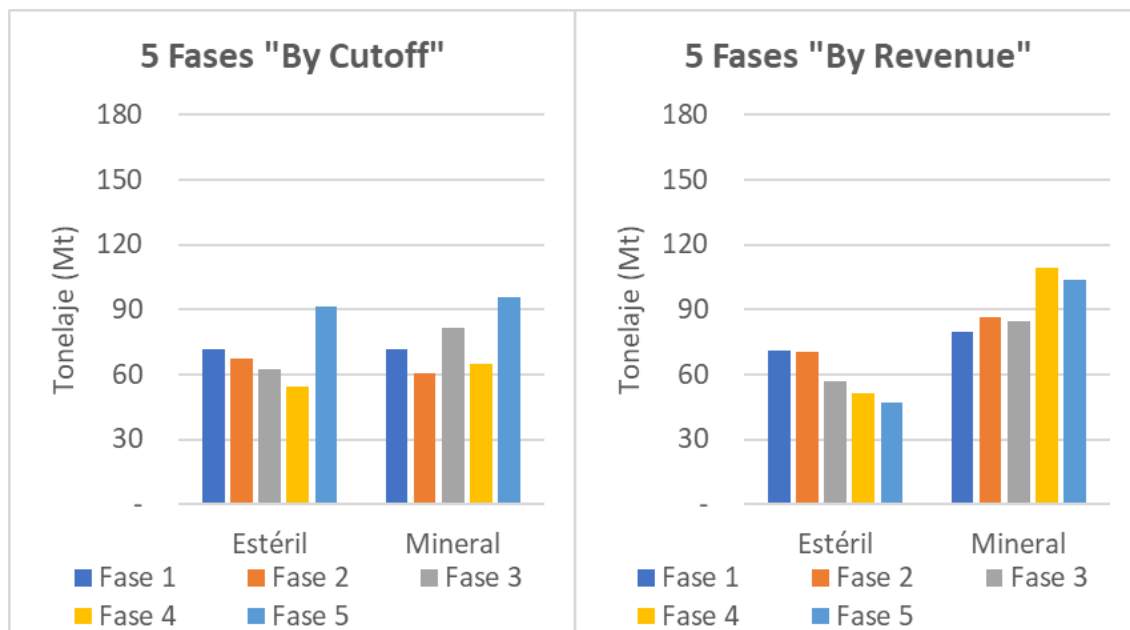


Figura 18. Gráficos de toneladas de estéril y mineral para el escenario de 5 fases para los dos métodos de valorización de bloques en Vulcan

De cada gráfico se observa que el método que más cumple con la restricción de toneladas similares por fase es el método "By Cutoff", cumpliéndolo en cada escenario. Además, se observa que el método "By Revenue" para los tres casos propuestos, genera una mayor cantidad de mineral que de estéril, mientras que el primer método trata de asimilar la cantidad de estéril con la de mineral. Para ver el detalle del tonelaje por fase revisar el Anexo D.

Respecto a la visualización de las fases, en las Figuras 19 y 20 se presentan las vistas en planta y del perfil Este 2568 de los tres escenarios propuestos para el método "By Revenue". La información correspondiente al método "By Cutoff" se presenta en el Anexo B.

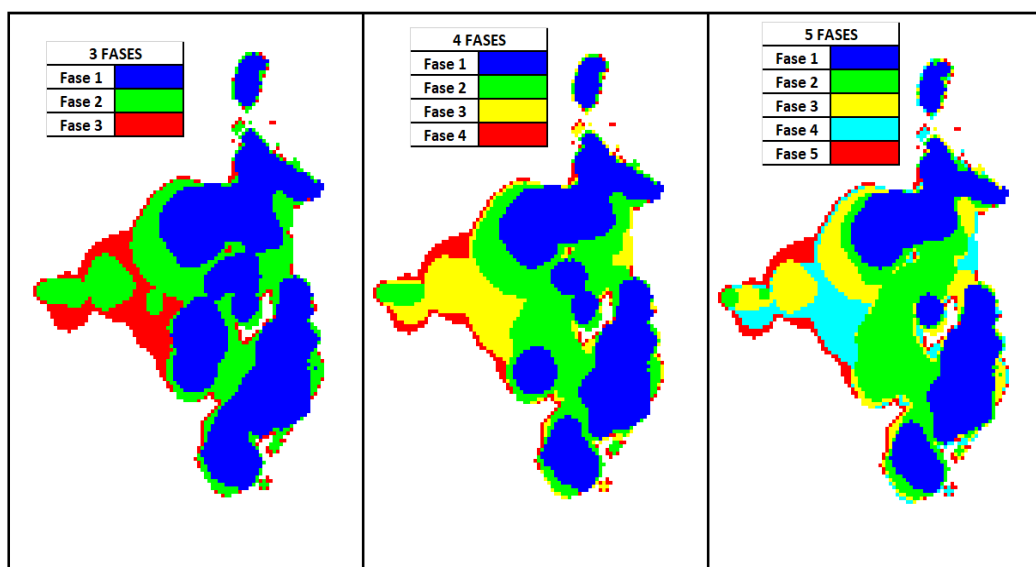


Figura 19. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases "By Revenue", Vulcan

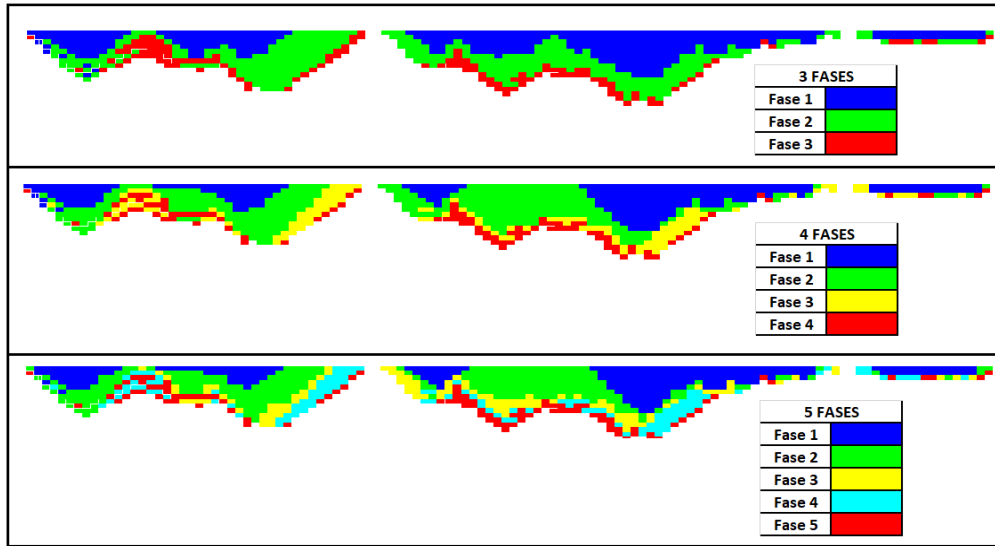


Figura 20. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Revenue”, Vulcan

De las vistas se observa que para cada escenario, se cumple que las fases se van expandiendo con una dirección Suroeste, siendo el Oeste la dirección predominante en cada caso.

4.3.2 Doppler

Para la definición de pushbacks en este software se definieron 3 escenarios de 3, 4 y 5 fases para ser analizadas, estas fueron realizadas mediante la selección automática de fases que dispone Doppler. En las Figuras 21 y 22 se presentan los resultados obtenidos de los tonelajes de extracción tanto de estéril como de mineral para cada escenario propuesto:

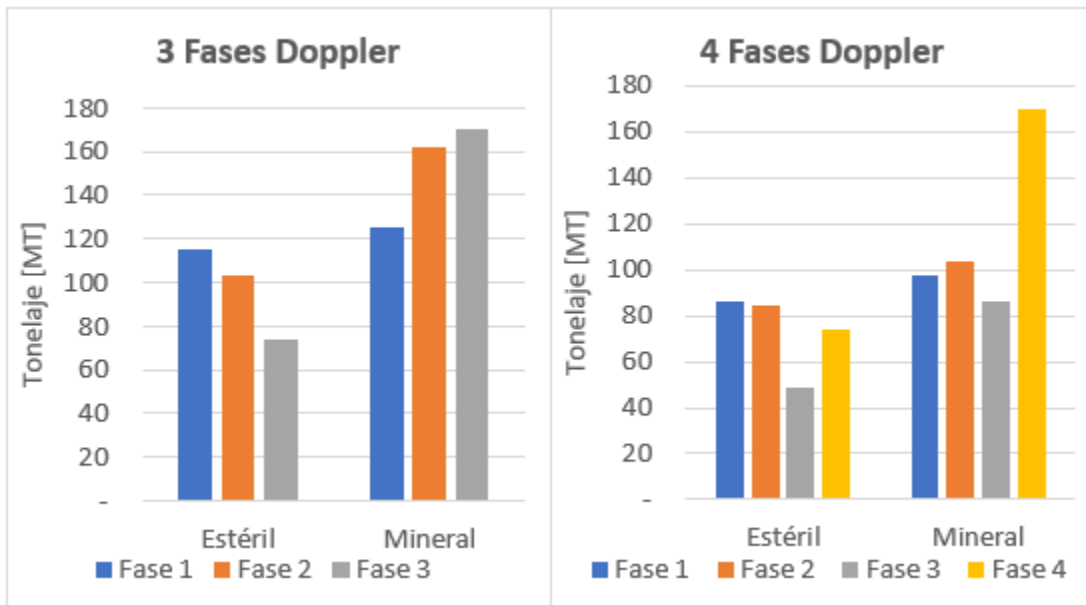


Figura 21. Gráficos de tonelajes de estéril y mineral para los escenarios de 3 y 4 fases Doppler

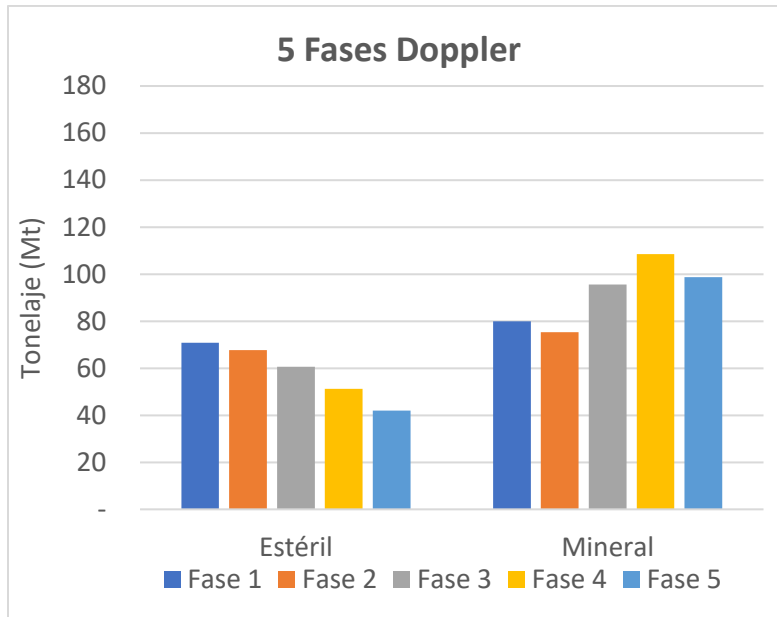


Figura 22. Gráfico de tonelajes de estéril y mineral para el escenario de 5 fases Doppler

De los gráficos adjuntos se puede observar que el software trata de mantener una prolijidad en la cantidad de tonelaje a extraer por cada material entre cada fase, habiendo solo una gran diferencia en la cantidad de mineral de la cuarta fase para el caso de una subdivisión del proyecto en 4 fases. Para ver el detalle del tonelaje por fase revisar el Anexo D.

Respecto a las visualizaciones de las fases, en las siguientes Figuras 23 y 24, se presentan las vistas de planta y del perfil Este 2568 respectivamente obtenidas en Doppler:

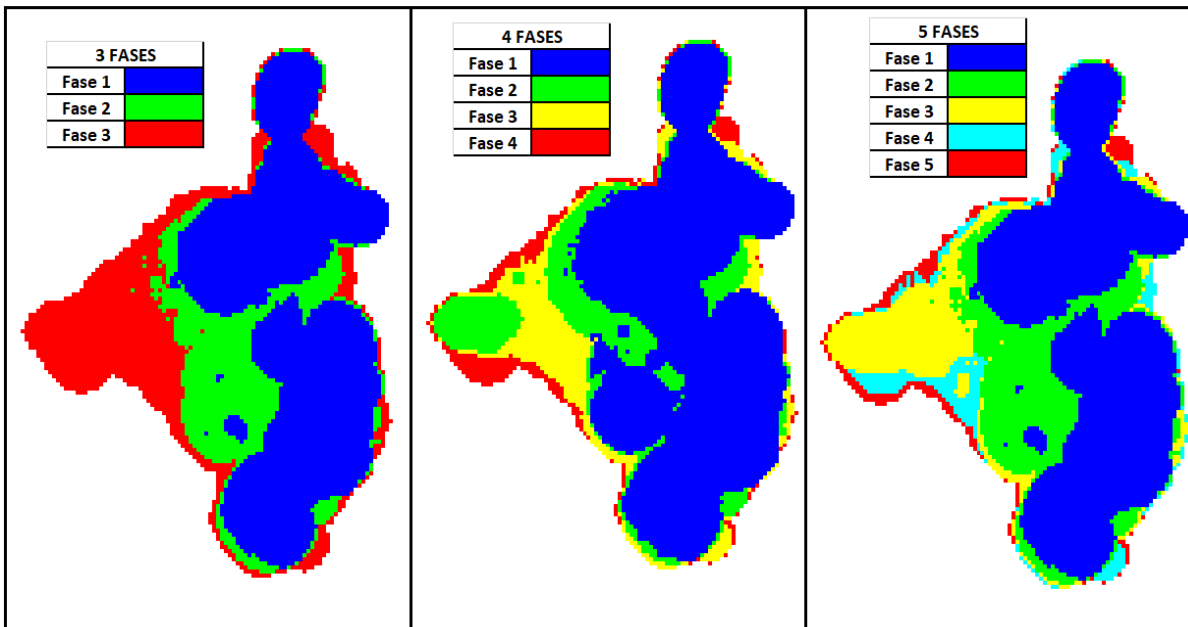


Figura 23. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Doppler

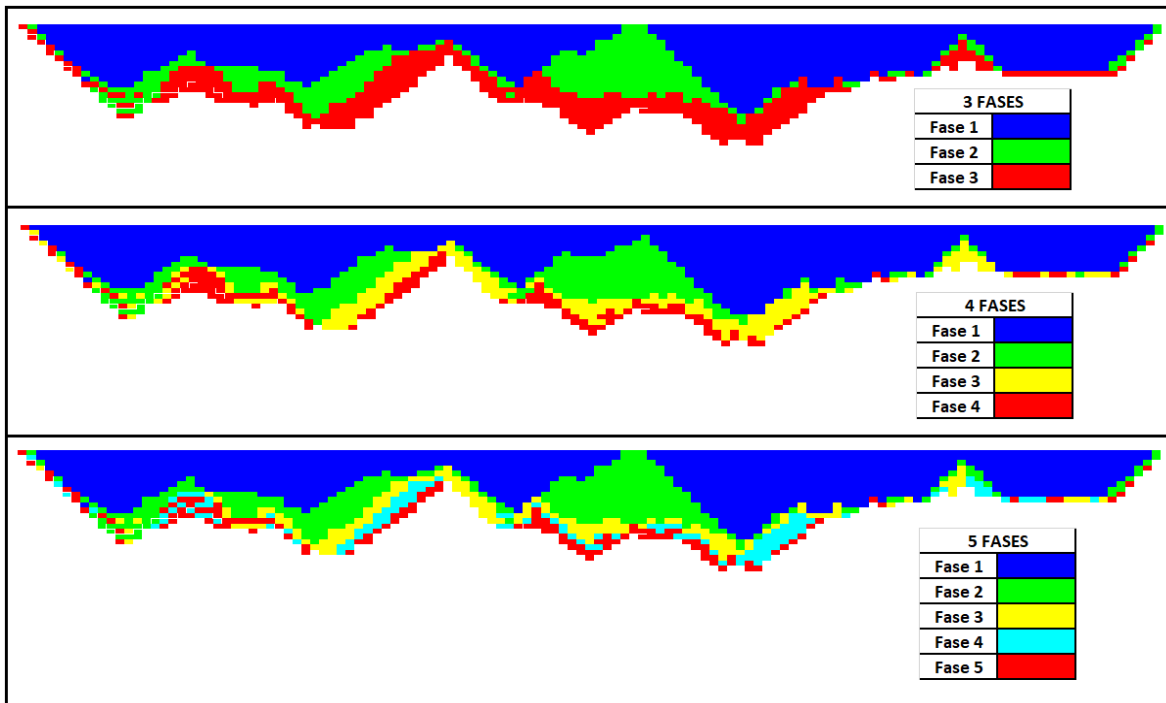


Figura 24. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Doppler

De las figuras adjuntas, se observa por un lado que la primera fase de cada escenario es la que predomina a nivel geométrico en el yacimiento, mientras que las últimas fases de cada escenario son las que menos predominan a nivel geométrico, a pesar de poseer tonelajes similares en cada uno.

Por otro lado, se observa que para cada caso, la expansión de las fases se aplica en la misma dirección Suroeste, siendo la dirección Oeste la que sobresale.

4.3.3 Studio NPVS

De la misma manera que los softwares anteriores, se definieron tres escenarios para el análisis: 3, 4 y 5 fases. Para esta instancia, se definió en cada escenario un ancho mínimo de 30 metros de operación entre los límites de cada pushback. Además, se agregó una configuración de extracción de material mínimo por cada fase solicitada por el software, esta configuración se puede observar en la Tabla 26 presente en el Anexo C.

Dado lo mencionado anteriormente, en las Figuras 25 y 26 se presentan los resultados obtenidos de los tonelajes de estéril y mineral por cada caso propuesto:

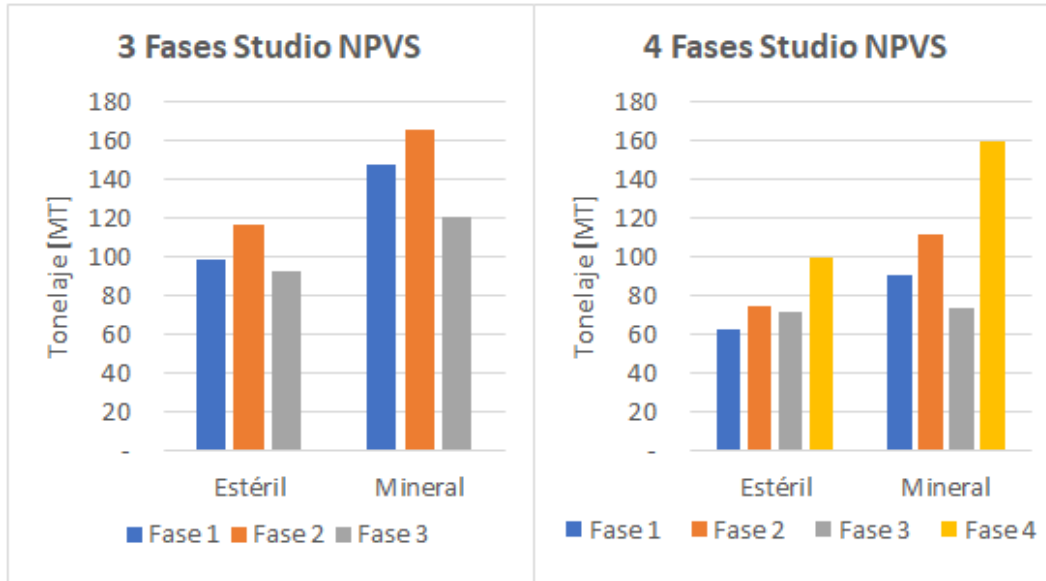


Figura 25. Gráficos de toneladas de estéril y mineral para los escenarios de 3 y 4 fases Studio NPVS

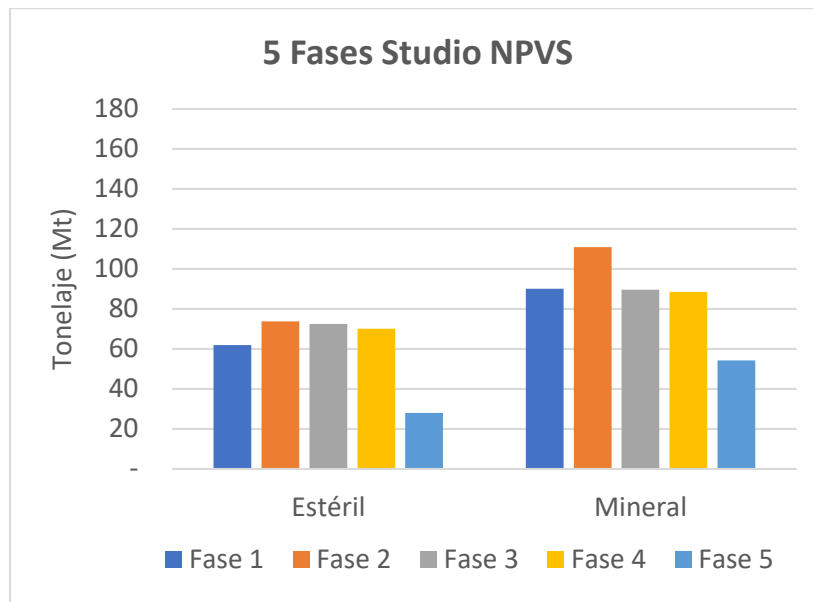


Figura 26. Gráfico de toneladas de estéril y mineral para el escenario de 5 fases Studio NPVS

De los gráficos presentados se observa a nivel general que el software trata de siempre privilegiar la presencia de mineral antes que de estéril. Respecto al escenario de 3 y 5 fases, estos tienen comportamientos similares, mientras que, para el escenario de 4 fases, se tiene una mayor diferencia de toneladas tanto de estéril como de mineral, en especial para la cuarta fase. Para el detalle del tonelaje por fase, revisar Anexo D.

Ahora, respecto a las visualizaciones de las fases, en las Figuras 27 y 28 se presentan las vistas en planta y del perfil E2568 respectivamente para cada escenario propuesto.

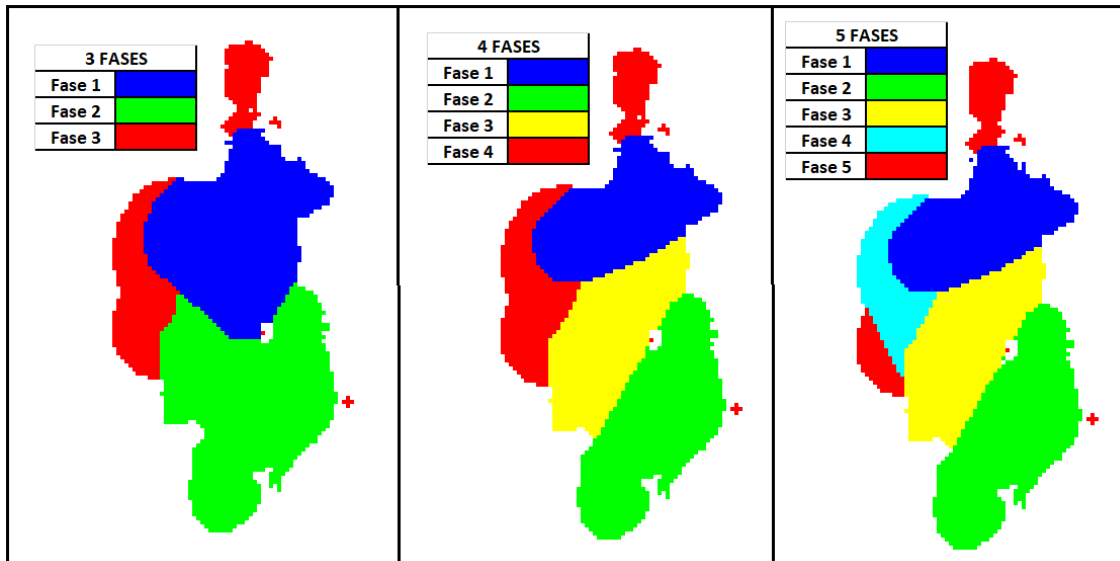


Figura 27. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Studio NPVS

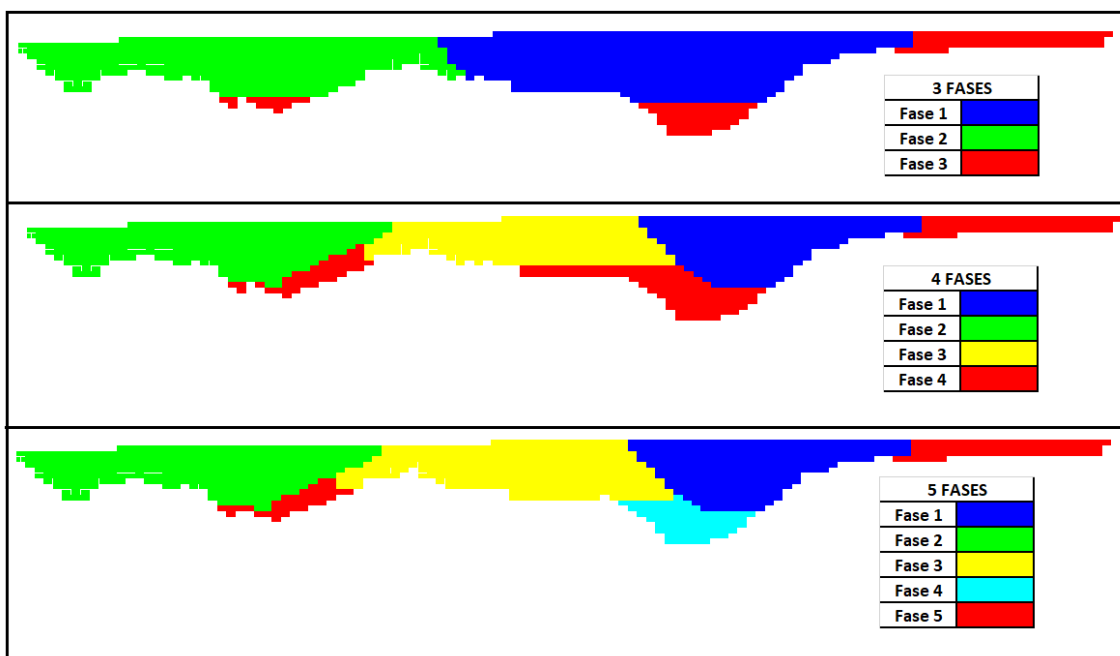


Figura 28. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases Studio NPVS

De las figuras adjuntas y al compararlas con los mismos resultados obtenidos en los softwares anteriores, se tiene que Studio NPVS no considera en el diseño matemático de sus fases el sector ubicado al Oeste del yacimiento, mientras que Vulcan y Doppler sí lo consideran. Esto se puede deber al ancho mínimo que tiene que haber entre una fase y otra, descartando dicho sector por aquel criterio.

Respecto a lo particular de estas visualizaciones, se observa que las expansiones ocurren hacia el sur y luego terminan en el sector oeste del yacimiento. Además, se observa tanto a nivel planta como de perfil, que no hay una continuidad física en la expansión de las operaciones de las fases.

4.4 Plan de producción

Para la confección de los planes de producción se tuvo en consideración aplicar en cada software las mismas restricciones de capacidad de mina y de planta, y una tasa de descuento constante a lo largo de los periodos de un 10%.

4.4.1 Vulcan

Para la generación del plan de producción se tuvieron en consideración nuevamente los mismos escenarios de 3, 4 y 5 fases para ambos métodos ya mencionados anteriormente. En las siguientes figuras se presentan todos los planes de producción realizados para el método “By Revenue”. Los planes de producción respectivos para el método “By Cutoff” se presentan en el Anexo E.

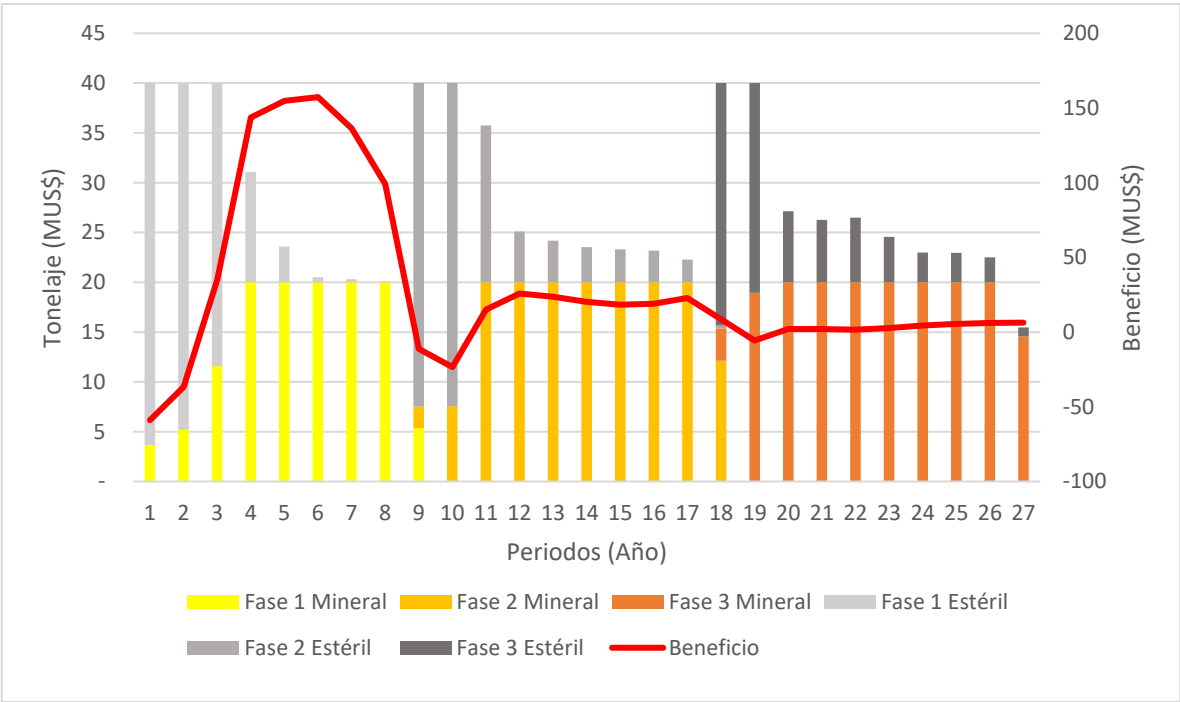


Figura 29. Plan de producción 3 fases “By Revenue” en Vulcan

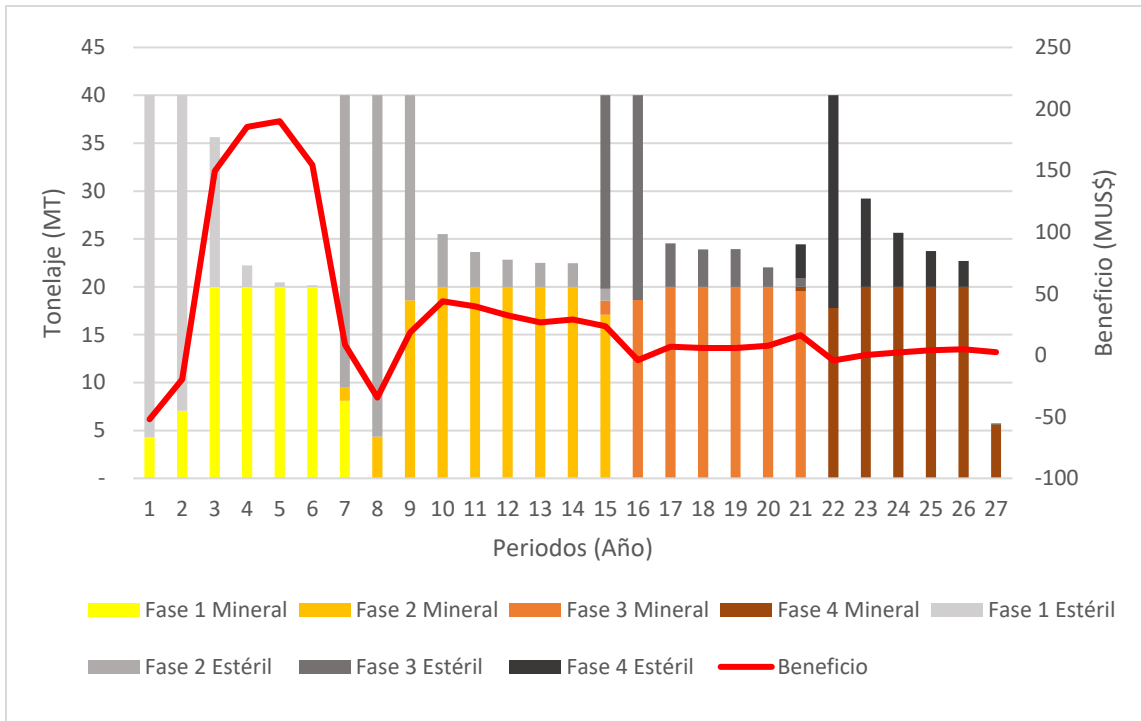


Figura 30. Plan de producción 4 fases “By Revenue” en Vulcan

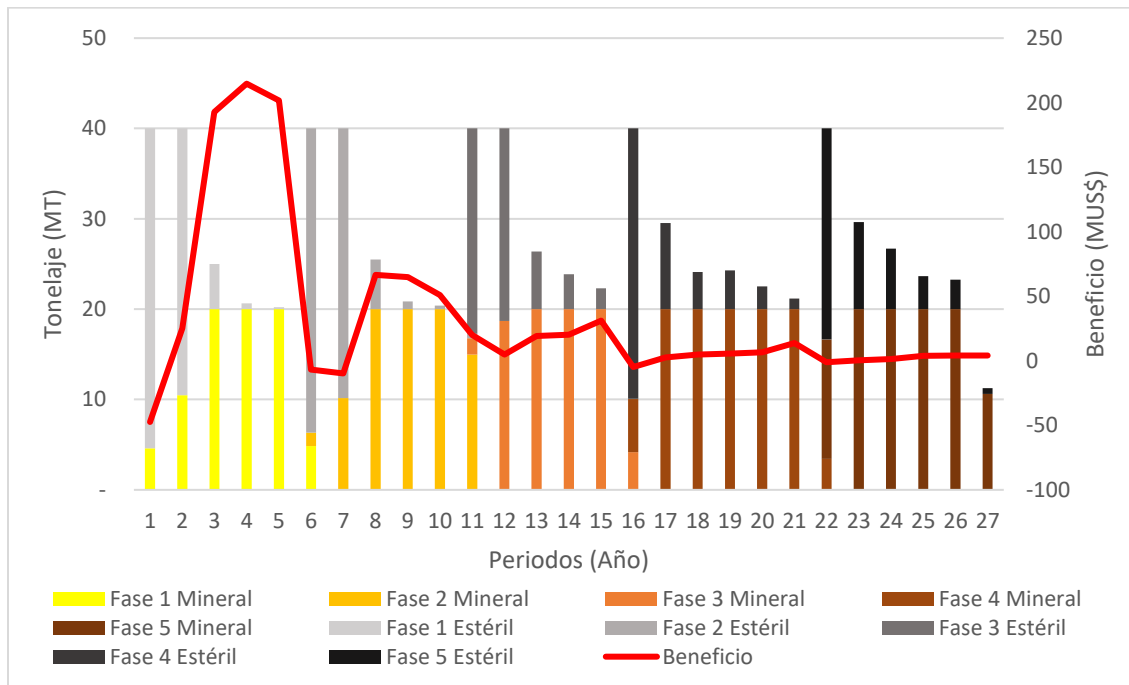


Figura 31. Plan de producción 5 fases “By Revenue” en Vulcan

En la Tabla 9 se presenta la información correspondiente a cada plan de producción obtenido en Vulcan además del cálculo del VAN:

Tabla 9. Información obtenida de cada plan de producción en Vulcan

	Método By Cutoff			Método By Revenue		
	3 Fases	4 Fases	5 Fases	3 Fases	4 Fases	5 Fases
Estéril (Mt)	347.32	347.32	347.32	296.90	296.90	296.90
Mineral (Mt)	374.92	374.92	374.92	464.37	464.37	464.37
VAN (MUS\$)	361.39	470.51	521.25	774.40	843.43	889.13
Periodos	23	23	23	27	27	27

De la información aportada por cada plan de producción, por un lado, se observa que el software nunca sobrepasa el límite indicado por la capacidad mina. Sin embargo, el tonelaje de mina y de planta es irregular año a año, teniendo descensos de estéril y de mineral en diferentes periodos a lo largo de la vida útil del yacimiento. Lo anterior se debe a que el software, independiente del método seleccionado, extrae completamente una fase antes de iniciar la siguiente.

Por otro lado, se observa que el método “By Revenue” en cada escenario reportado presentó 4 periodos más en su vida útil, además de casi duplicar en cada caso en VAN, lo cual indica que el método de valorización de bloques que tiene Vulcan podría generar grandes diferencias económicas para un proyecto minero.

4.4.2 Doppler

Para la generación de los planes de producción en este software y al igual que en Vulcan, se consideraron los mismos escenarios de las fases generadas anteriormente. Particularmente, se consideraron dos maneras para realizar el plan de producción, primero un caso sin restricciones de extracción de bancos entre fases y otra con restricciones. Para este último caso, se aplicó un Min Lead y Max Lead de 1 y 3 respectivamente para cumplir con dichos criterios. En las siguientes figuras se presentan todos los planes de producción reportados para todos los casos.

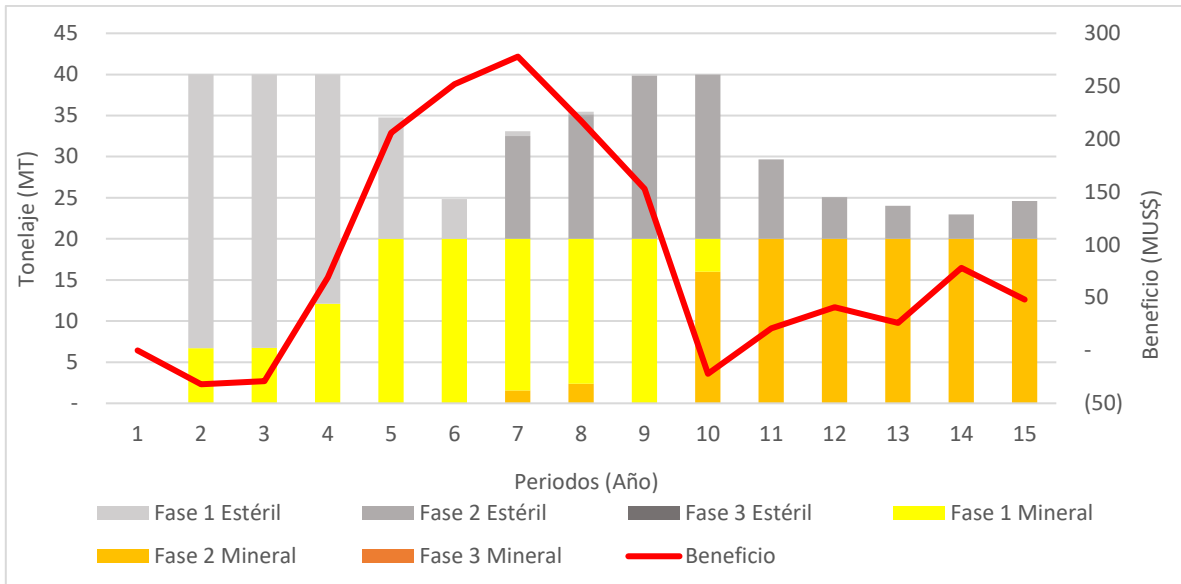


Figura 32. Plan de producción 3 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler

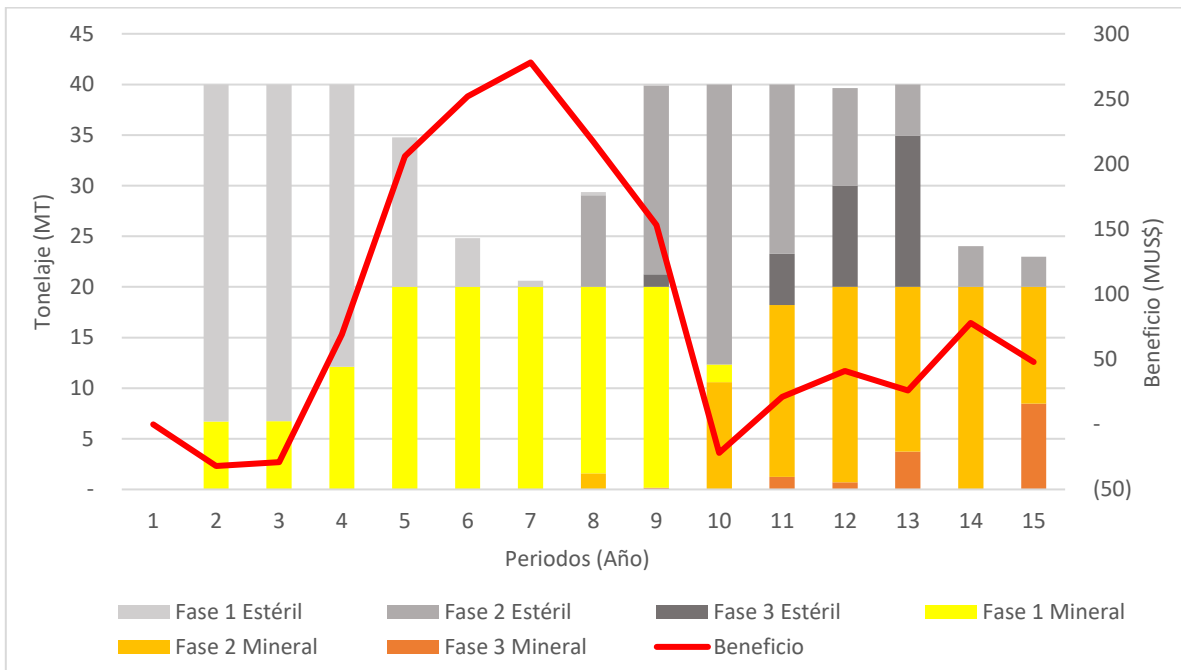


Figura 33. Plan de producción 3 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler



Figura 34. Plan de producción 4 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler

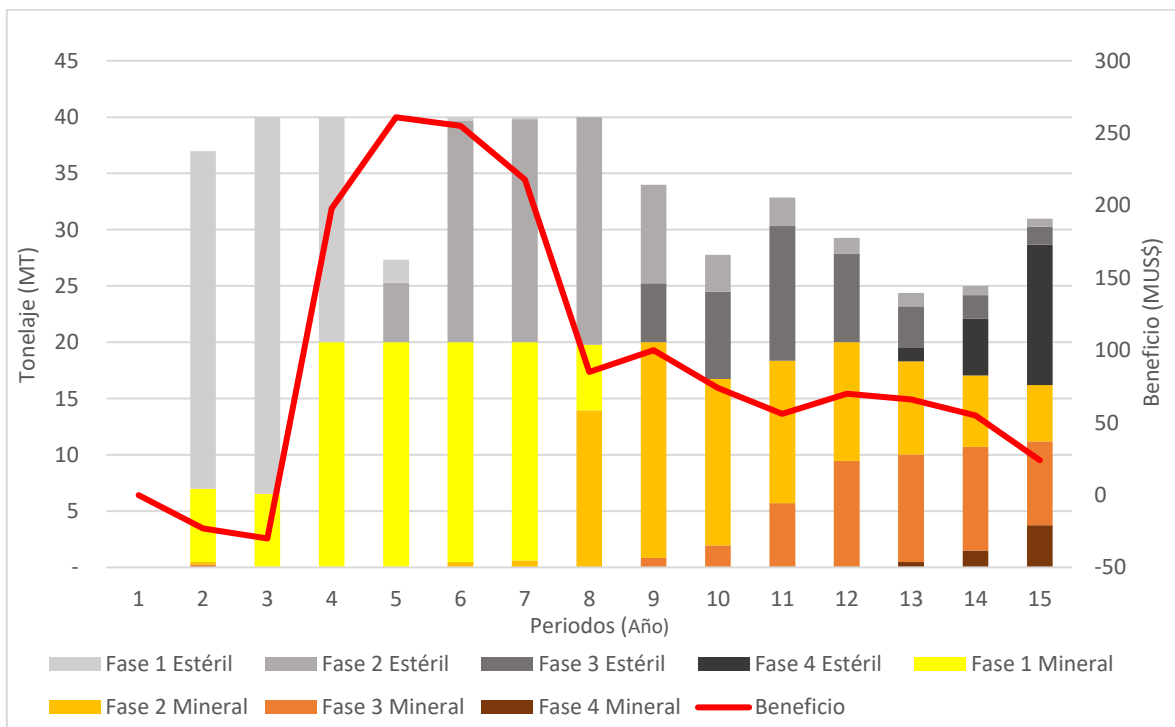


Figura 35. Plan de producción 4 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler

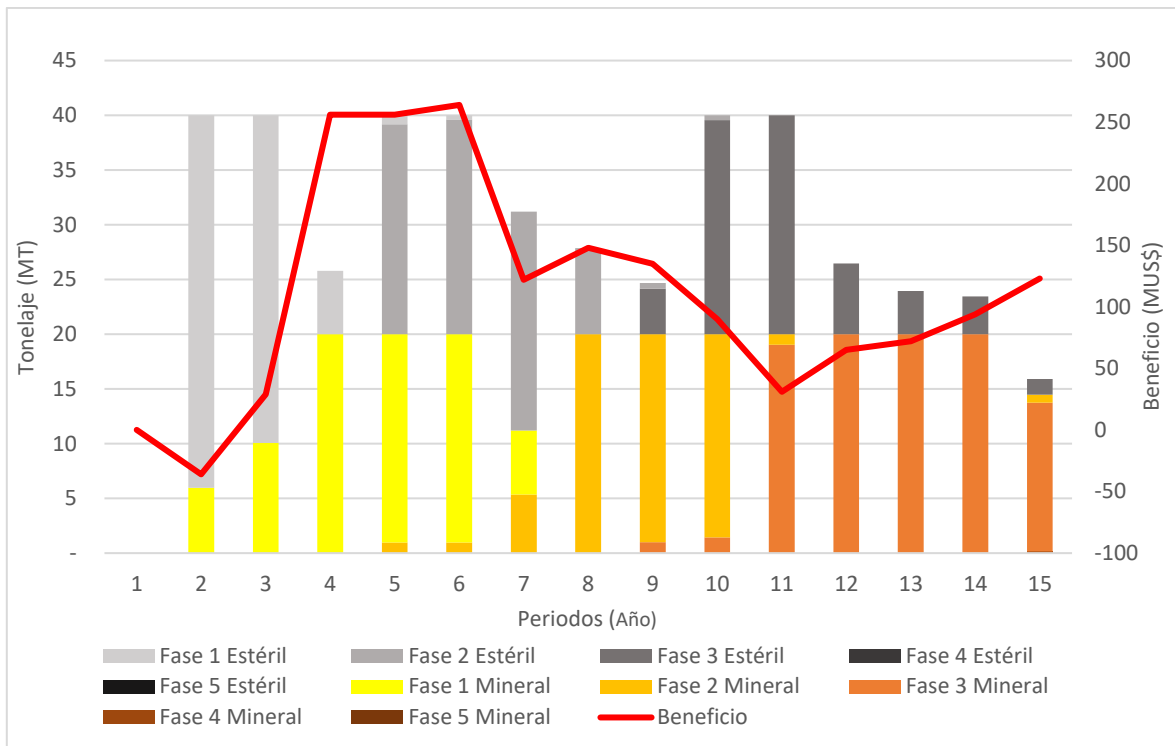


Figura 36. Plan de producción 5 fases sin Min/Max Lead obtenidos en Doppler

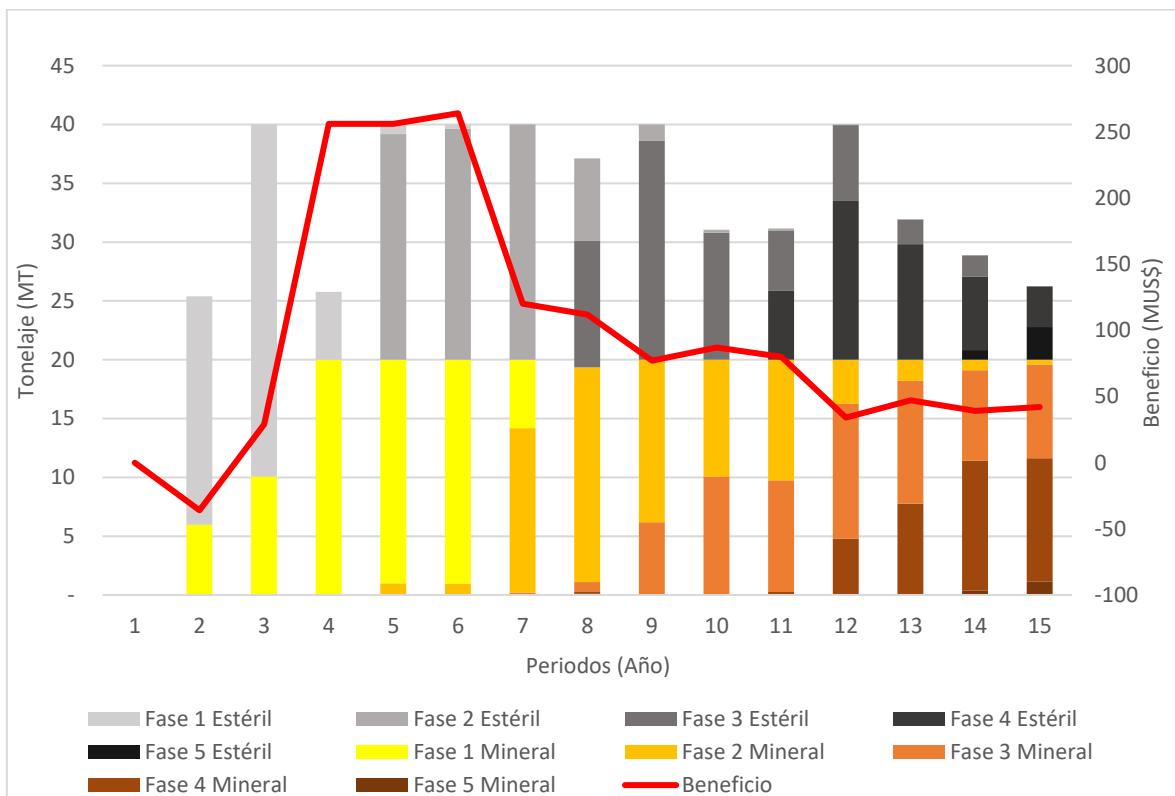


Figura 37. Plan de producción 5 fases con Min/Max Lead obtenidos en Doppler

En la Tabla 10 se presenta la información correspondiente a cada plan de producción obtenido en Doppler además del cálculo del VAN:

Tabla 10. Información obtenida de cada plan de producción en Doppler

	Sin Min/Max Lead			Min Lead 1 / Max Lead 3		
	3 Fases	4 Fases	5 Fases	3 Fases	4 Fases	5 Fases
Estéril (Mt)	208.92	211.78	197.51	240.08	228.66	222.04
Mineral (Mt)	245.55	253.52	241.71	236.12	239.91	255.40
VAN (MUS\$)	669.50	761.06	805.10	629.33	703.43	727.70
Periodos	15	15	15	15	15	15

De acuerdo a la información reportada, se observa que al aplicar restricciones de bancos al plan de producción en Doppler sí genera resultados diferentes a pesar de que todos generan la misma cantidad de periodos. Sin embargo, pese a que en todos los periodos se cumplen los límites de mina y de planta, existen periodos donde el tonelaje es irregular.

Por un lado, al comparar los tonelajes en cada caso, se observa que al aplicar Min/Max Lead a la metodología se extrae más cantidad de material en casi todos los casos, y observando visualmente los gráficos, al no aplicar este criterio, no se visualiza extracción en las últimas fases correspondientes (Figuras 33, 35 y 37), demostrando una mala planificación de fases.

Respecto a los VAN obtenidos en cada caso, se observa que al incorporar Min/Max Lead a la metodología, el VAN disminuye en promedio en un 8% para los tres escenarios de fases. Por otra parte, al comparar los VAN calculados en Doppler estos son similares a los obtenidos con el método “By Revenue” en Vulcan.

4.4.3 Studio NPVS

En este software, se consideraron los mismos escenarios utilizados para la definición de fases: 3, 4 y 5 fases para la generación de cada plan de producción. Para esta etapa, además de incorporar las capacidades de tratamiento mina y de planta, se incorporó un parámetro llamado Strip, el cual indica la razón de estéril y mineral esperada a lo largo de todos los periodos. De acuerdo a las capacidades a este parámetro se le asignó un valor de 0.5. Por último, se le indicó al software que tenga como objetivo principal maximizar el VAN del plan minero.

Dicho esto, en las siguientes figuras se presentan los planes mineros obtenidos en Studio NPVS:

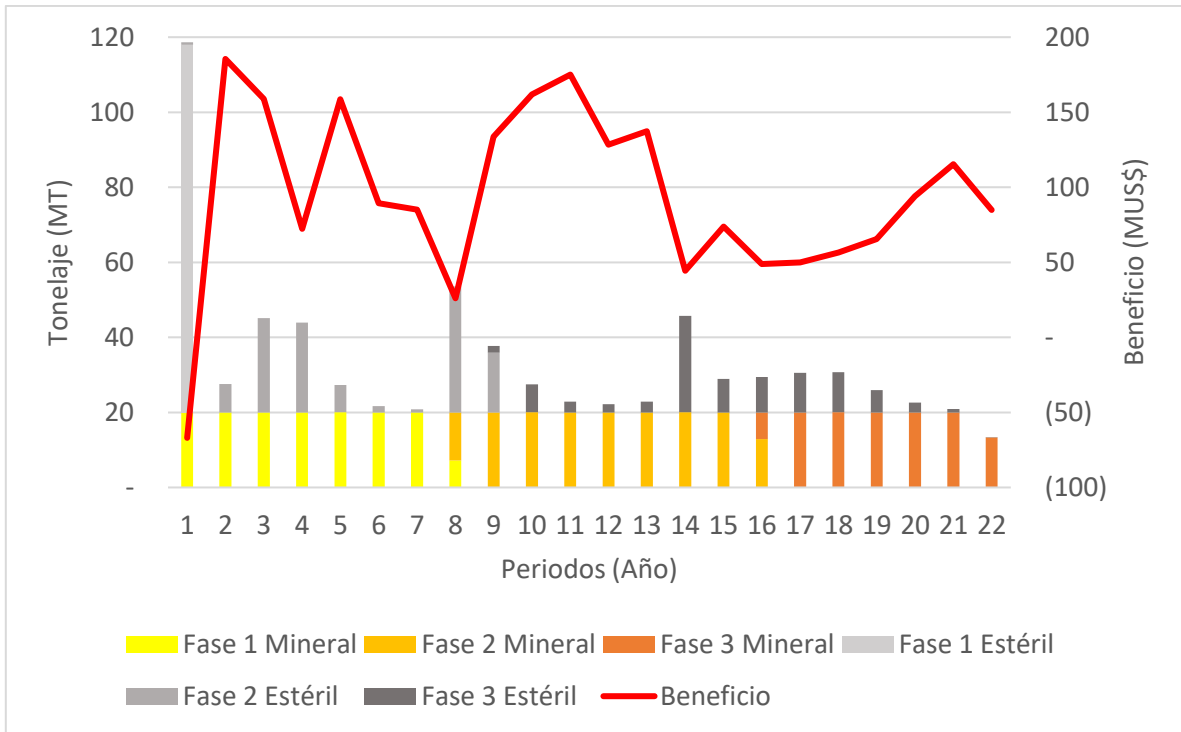


Figura 38. Plan de producción 3 fases obtenido en Studio NPVS

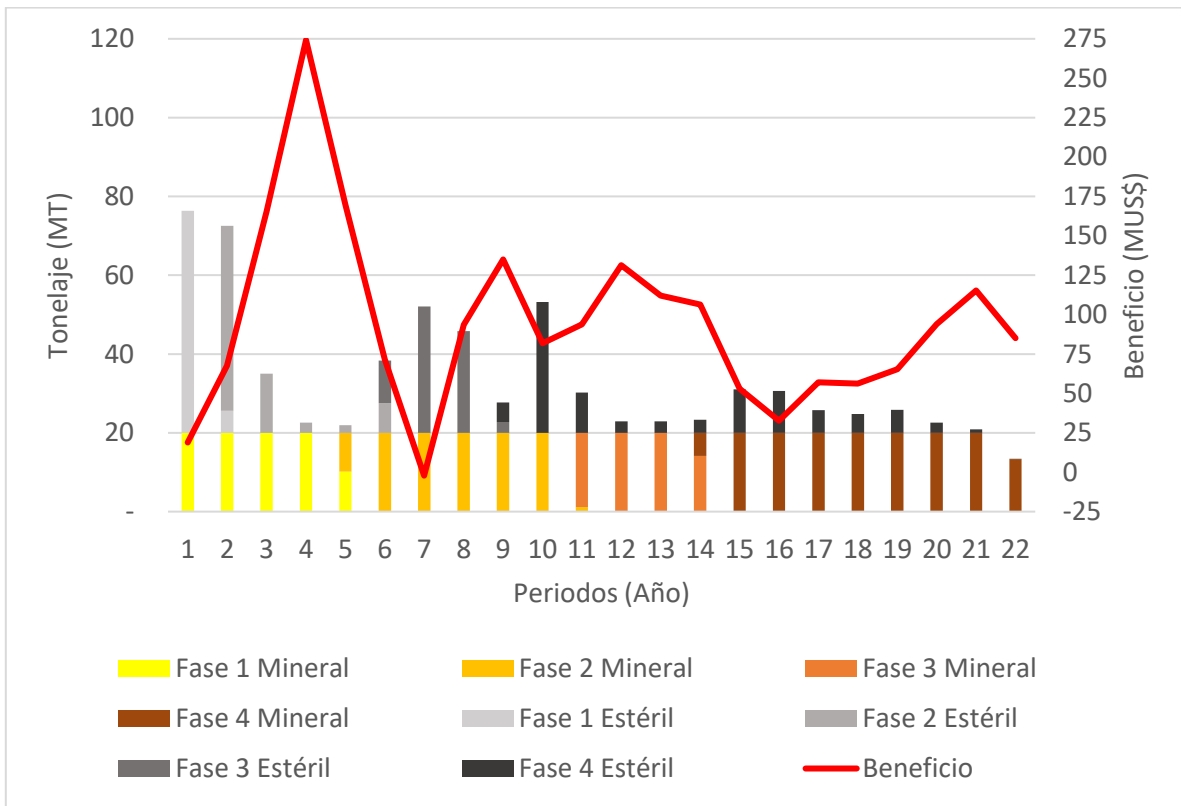


Figura 39. Plan de producción 4 fases obtenido en Studio NPVS

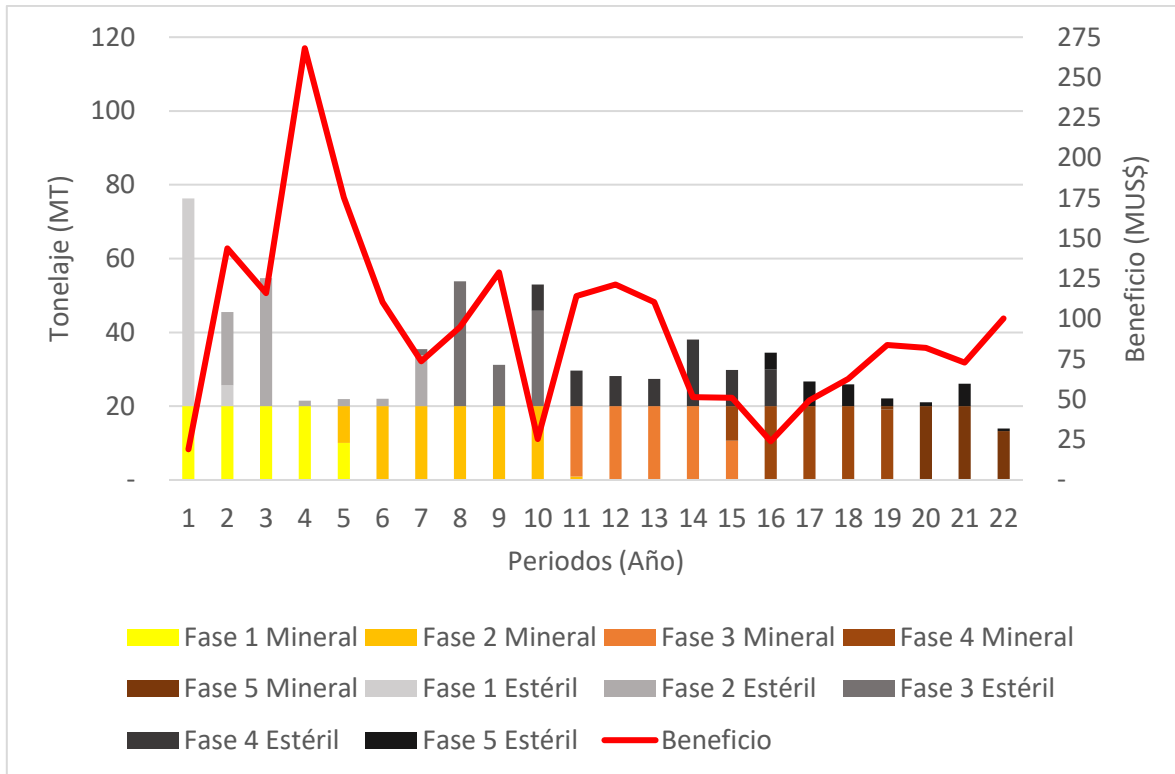


Figura 40. Plan de producción 5 fases obtenido en Studio NPVS

En la Tabla 11 se presenta la información correspondiente a cada plan de producción obtenido en Studio NPVS además del cálculo del VAN:

Tabla 11. Información obtenida de cada plan de producción en Studio NPVS

	3 Fases	4 Fases	5 Fases
Estéril (Mt)	306.54	306.54	306.43
Mineral (Mt)	433.35	433.35	433.27
VAN (MUS\$)	837.79	889.12	935.07
Periodos	22	22	22

De acuerdo a la información proporcionada de cada plan de producción, por un lado, se observa que la capacidad de planta se cumple en su totalidad para los tres escenarios, mientras que la capacidad mina no, generándose un pre-stripping al inicio de cada plan de producción provocando así una reducción en la cantidad de estéril a los periodos restantes de la vida útil del yacimiento.

Por otro lado, respecto a la información que aporta el VAN, se observa que esta va en aumento a medida que se aumentan la cantidad de fases del yacimiento, creciendo en un 12% desde el escenario de 3 a 5 fases. Respecto a los valores obtenidos, son bastante similares a los reportados por Vulcan con “By Revenue” y Doppler.

4.5 Comparación de etapas

En este apartado se redactarán las principales diferencias y similitudes respecto a toda la información recopilada en las metodologías de cada software como en los resultados obtenidos al realizar la planificación de largo plazo.

4.5.1 Valorización de bloques

Para la valorización de los bloques, los tres softwares siguen metodologías similares, donde inicialmente se solicitan todas las precedencias, los parámetros económicos y geométricos a utilizar. La diferencia entre estos softwares se halla principalmente en cómo estos tienen diferentes métodos para categorizar si un bloque es definido como mineral o estéril. Donde Vulcan cuenta con dos métodos, Studio NPVS con cinco, mientras que Doppler no utiliza métodos para discretizar directamente si un bloque es estéril o no, puesto que, para llevar a cabo una valorización, Doppler necesita crear columnas de valor ya sea de planta o de botadero mediante fórmulas manuales.

4.5.2 Pits Anidados y Pit Final

Para la generación de los pits anidados, nuevamente los tres softwares utilizan la misma metodología para generar los pits. Sin embargo, al aplicarse las fórmulas de beneficio en cada software, se observa que en Vulcan y en Doppler el Revenue Factor se aplica como un multiplicador del precio del producto de interés, mientras que Studio NPVS el Revenue Factor es un multiplicador de la diferencia entre el precio del metal con su costo de refinación y ventas, afectando a los resultados reportados pit a pit en cuanto a tonelaje y beneficios se refiere.

4.5.3 Fases

Para la definición de fases, Doppler y studio NPVS son los softwares que cuentan con la herramienta para definir las fases de manera manual y automática. En cuanto a Doppler, si se selecciona la opción automática de fases, Doppler tiene como objetivo que cada fase tenga una cantidad de tonelaje similar entre sí.

Por otro lado, Studio NPVS está facultado para generar las fases a partir de pits anidados calculados previamente o no, solicitándole al usuario indicar el ancho operacional mínimo entre los límites de cada pit, profundidad de bancos y el tonelaje mínimo de extracción por fase. En el caso de Vulcan, para definir las fases, el usuario tiene que definir qué criterios seguir para determinar las fases a partir de la generación de los pits anidados previamente obtenida.

Respecto a las fases obtenidas, Doppler presenta unas fases más realistas, puesto que es el único software que tiene en consideración el diseño continuo de la expansión de sus fases, lo cual ayuda a futuros trabajos al momento de realizar la operativización fase a fase.

4.5.4 Plan de Producción

En esta etapa, el software que más se diferencia de los demás es Doppler, puesto que es el único software que dispone de una herramienta para realizar un plan de producción mediante un Agendamiento Directo de bloques.

Ahora bien, respecto a lo único en común que tienen los tres softwares para llevar a cabo un plan minero es que todos solicitan la capacidad de tratamiento mina, de planta y la tasa de descuento que se aplicará año a año al proyecto. Doppler en lo particular, es el único software que permite aplicar un criterio de Min/Max Lead, restringiendo los bancos a explotar entre fases. Studio NPVS cuenta con un criterio “Max Sink Rate” el cual indica la cantidad de bancos máximos que puede operar cada fase.

En cuanto a las particularidades de los softwares, Vulcan genera cada plan de producción teniendo en cuenta una extracción secuencial de sus fases, es decir, extrae completamente una fase antes de seguir con la siguiente. Studio NPVS por su parte, no respeta la capacidad de tratamiento mina en varios de sus periodos, puesto que, al momento de indicar una razón de estéril mineral como restricción, el software prioriza casi en su totalidad el cumplimiento de la capacidad a planta sacrificando la capacidad mina.

Para comparar el VAN en cada software, se dejaron de lado los métodos “By Cutoff” en Vulcan y el que utiliza la opción “Min/Max Lead” en Doppler, por ser las opciones con el menor VAN en los respectivos softwares. En la Tabla 12 se presenta la comparativa con los resultados respectivos reportados.

Tabla 12. Comparación del VAN por cada software

Sosftwares/ Escenarios	VAN (MUS\$)		
	3 Fases	4 Fases	5 Fases
Vulcan “By Revenue”	774.40	843.43	889.13
Doppler sin Min/Max Lead	669.50	761.06	805.10
Studio NPVS	837.79	889.12	935.07

Respecto al VAN reportado en cada software, por un lado, se observa la misma tendencia en los tres programas de que un aumento de fases implica un aumento en el VAN. Por otro lado, a pesar de que Studio NPVS aporta los mayores valores en el VAN, esto no tiene un valor significativo en un buen plan de producción por los errores presentados en el límite de la capacidad mina.

Ahora bien, en cuanto a las diferencias presentadas entre Vulcan y Doppler, estas se pueden deber a la diferencia de tonelaje utilizado en los planes de producción en cada software. Lo anterior se debe a que Doppler no integra en su totalidad el tonelaje reportado en la instancia de pushbacks a la creación de los planes de producción, disminuyendo el tonelaje total, en promedio, en un 39% en los tres escenarios analizados sin utilizar la restricción de fases y en un 37% al utilizarla.

4.6 Comparaciones generales

Respecto al trabajo preliminar que se necesita realizar con el modelo de bloques en cada software como la modificación previa, importación, manipulación y exploración, el software más sobresaliente respecto a los demás es Vulcan. Este software destaca al ser capaz de soportar una amplia variedad de extensiones de archivo durante la importación proporcionando una gran flexibilidad. Además, permite realizar trabajos inmediatos con las diferentes herramientas disponibles en su menú

Doppler por su parte, presenta ciertas limitaciones, ya que su principal inconveniente radica en la imposibilidad de importar modelos de bloques que no sean archivos de texto. A pesar de esta restricción, este software comparte junto a Vulcan, la capacidad de facilitar el trabajo y la exploración de herramientas de manera inmediata.

En cuanto a Studio NPVS, destaca al igual que Vulcan en ser capaz de admitir diferentes formatos de archivos como modelos de bloques. Sin embargo, este software presenta deficiencias respecto a la manipulación de variables y generación de estadísticas del modelo.

En cuanto al desarrollo general de las labores de planificación de largo plazo, todos los softwares siguen el mismo lineamiento en cada etapa, pero ninguno lo realiza de manera idéntica, provocando mayores o menores dificultades el desarrollo de las tareas de planificación.

Por otro lado, Vulcan al ser el único software que cuenta con herramientas para las actividades de planificación minera de corto y de mediano plazo, puede ser engorroso para un nuevo usuario que está conociendo el software por su vasta gama de herramientas. Lo mismo sucede con Studio NPVS, que, a pesar de realizar solo planificación de largo plazo, cuenta con una gran variedad de herramientas para su desarrollo. Doppler por su parte, es un software más específico, cuenta con las herramientas justas y necesarias para poder realizar la planificación minera de largo plazo, por lo cual su aprendizaje podría ser el menos dificultoso para un nuevo usuario.

Ahora bien, como se mencionó en la sección de alcances, el hardware donde se desarrollaron los trabajos en Vulcan y en Studio NPVS es más avanzado que el que se utilizó para Doppler, por lo cual la comparación de los tiempos de cómputo se realizará en base a los dos primeros softwares mencionados.

Para cada etapa de cálculo, tanto en Vulcan como en Studio NPVS, los tiempos de cómputo fueron rápidos, promediando un tiempo de un minuto y medio aproximadamente entre los dos programas, donde la etapa para obtener los pits anidados fue la que más tardó en desarrollarse en ambos softwares con un tiempo aproximado de 2 minutos.

A modo de comentario, respecto a los tiempos de cómputo en Doppler, la instancia de pits anidados tuvo un tiempo en promedio de 15 minutos, mientras que para todas las demás actividades de optimización, los tiempos fueron de 5 minutos aproximadamente. Respecto a las especificaciones técnicas de cada hardware donde fue desarrollado el trabajo de la presente memoria se presentan en el Anexo F.

4.7 Matriz de Ventajas y Desventajas

A continuación, se presenta la Tabla 13 que muestra un breve resumen de las ventajas y desventajas que quedaron al descubierto tras realizar el trabajo en cada software.

Tabla 13. Comparación de ventajas y desventajas disponibles en cada software

Comparación	Vulcan	Doppler	Studio NPVS
Permite la importación de modelos de bloques con más de una extensión de archivo, como también la importación de superficies, triangulaciones y otros archivos.	✓	×	✓
Dispone de herramientas para la manipulación de variables dentro del software.	✓	✓	×
El software tiene herramientas para la planificación minera de corto, mediano y largo plazo.	✓	×	×
Existen herramientas para la generación de estadísticas, curvas de tonelaje ley e histogramas.	✓	✓	×
Dispone de un botón de ayuda (F1) en todo momento para atender consultas.	✓	×	✓
El software puede discriminar si un bloque es estéril o mineral a través de uno o más métodos.	✓	×	✓
Permite la variación de los Revenue Factors, indicando el valor mínimo, máximo y su incremento.	✓	✓	×
Utiliza el algoritmo de Lerchs & Grossman para la generación de pits anidados.	✓	×	✓
Permite una selección manual y automática de fases.	×	✓	×
Permite indicar restricciones respecto a los bancos entre fases para la generación de un plan minero.	×	✓	✓
Se puede indicar la capacidad de tratamiento mina y de planta, como también la tasa de descuento a aplicar al plan de producción.	✓	✓	✓
Cuenta con una herramienta para ver el destino de cada bloque al realizar el plan de producción.	×	✓	×

5 RESULTADOS CASO DE ESTUDIO B

Este caso de estudio corresponde al mismo caso previamente trabajado, con la única diferencia que al ángulo de inclinación de las paredes del talud se le aplicaron 2 variaciones para todos los sectores de la mina, con el fin de verificar diferencias en el diseño de los pits.

Es por ello, que este caso de estudio B se subdividirá en un caso B1 y un caso B2 para cada nuevo ángulo de talud. En la Tabla 14 se presenta la configuración de las inclinaciones aplicadas en cada caso.

Tabla 14. Nueva configuración geométrica de las paredes del talud

Caso de estudio	Slope (°)
Caso B1	40
Caso B2	50

5.1 Pits Anidados y Pit final

Para la valorización de los bloques, se aplicaron los mismos parámetros económicos utilizados en el caso de estudio A, de acuerdo a lo indicado por la Tabla 4 ya presentada. A diferencia del primer caso de estudio, para esta situación Vulcan se subdividirá en dos capítulos, dependiendo de su método de valorización de bloques.

5.1.1 Vulcan “By Cutoff”

Aplicando la misma metodología que para el caso de estudio A se desarrollaron los pits anidados para ambos casos propuestos, donde en cada uno se determinaron 58 pits. Para su visualización ver Anexo G.

Respecto al resumen de las características reportado por este método en Vulcan, en las Tablas 15 y 16 se presenta la información para el primer y último pit respectivamente.

Tabla 15. Comparación de características del primer pit para Vulcan por “By Cutoff”

PRIMER PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B1	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B2	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020

Tabla 16. Comparación de características del último pit para Vulcan por “By Cutoff”

ULTIMO PIT	PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	58	1.00	804.320	413.468	390.851	1,876.213	0.447
Caso B1	58	1.00	813.968	397.949	416.019	1,738.044	0.449
Caso B2	58	1.00	809.857	429.504	380.354	1,986.583	0.446

De la información presente en la Tabla 15, se observa que para el primer pit todos los datos permanecen invariantes independientemente de los grados de inclinación que se apliquen.

En cuanto a la información proporcionada por el último pit, se observa que para el caso B1, al disminuir el ángulo de inclinación, la cantidad de material aumenta, pero la cantidad de mineral disminuye lo que provoca una baja considerable en el beneficio respecto al primer caso de estudio. Comparando de manera análoga con el caso B2, si el ángulo de inclinación aumenta, la roca total y el mineral aumentan, superando la razón que existe en el caso A de mineral por un 2%, generando un incremento considerable en el beneficio del último pit.

5.1.2 Vulcan “By Revenue”

Siguiendo la misma metodología ya aplicada en el presente trabajo, se obtuvieron 58 pits anidados en los dos casos. La distribución de los tonelajes para cada caso de estudio se puede visualizar en los gráficos pit by pit en el Anexo G.

En las Tablas 17 y 18 se presenta la información del primer y último pit respectivamente, obtenido para los casos B1 y B2 como también para el caso de estudio A.

Tabla 17. Comparación de características del primer pit para Vulcan por “By Revenue”

PRIMER PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B1	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B2	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020

Tabla 18. Comparación de características del último pit para Vulcan por “By Revenue”

ULTIMO PIT	PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	58	1.00	848.378	521.004	327.374	1,984.898	0.414
Caso B1	58	1.00	850.588	504.272	346.317	1,850.735	0.414
Caso B2	58	1.00	871.033	552.649	318.384	2,103.205	0.411

Respecto a la información del primer pit, se observa que a pesar de variar la inclinación de los ángulos de talud, los datos no varían.

Ahora bien, en cuanto al último pit, se logra apreciar que tanto al aumentar como al disminuir la inclinación del talud la cantidad de roca total aumenta, sin embargo, respecto al caso B1, la razón de mineral con la roca total disminuye en un 2% respecto al primer caso de estudio, situación contraria ocurre con el caso B2 que aumenta en un 2% dicha razón. Estas bajas y alzas de mineral respecto del total son la causa de las considerables variaciones que existen en el beneficio del pit como se muestra en la Tabla 18.

5.1.3 Doppler

Siguiendo la misma metodología ya utilizada en el presente trabajo, Doppler tiene solo una modalidad para definir sus pits anidados y pit final. En esta línea, se obtuvieron 59 pits anidados al correr dicha instancia para ambos casos, el detalle de la distribución de los tonelajes en cada caso de estudio se puede encontrar en el Anexo G a través de los gráficos pit by pit.

En las Tablas 19 y 20 se presentan los resultados obtenidos respecto al primer y último pit para los nuevos casos de estudio como también para el caso A.

Tabla 19. Comparación de características del primer pit en Doppler (Caso B)

PRIMER PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B1	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020
Caso B2	0.42	0.024	0.024	0.000	0.784	1.020

Tabla 20. Comparación de características del último pit en Doppler (Caso B)

ULTIMO PIT	PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	59	1.00	843.366	518.037	325.329	1,977.415	0.414
Caso B1	59	1.00	841.919	512.728	329.191	1,944.309	0.425
Caso B2	59	1.00	805.729	469.147	336.581	1,832.790	0.426

Al igual que en Vulcan, se aprecia que para el primer pit no hay variación de información al modificar el ángulo de talud.

Por otro lado, al comparar los pits finales en este software ocurre lo contrario a lo sucedido en Vulcan con sus dos métodos, puesto que la cantidad de material total disminuyó respecto al primer caso de estudio. Al existir esta baja de material se observa que tanto la cantidad de mineral como el beneficio disminuyen de manera más abrupta en el caso B2 que para el caso B1, llegando a decrecer el beneficio hasta en un 7.3%.

5.1.4 Studio NPVS

Para este caso de estudio se hizo una vez más el método de valorización de bloques que viene por defecto en el software, correspondiente al primer método presentado en la metodología del presente trabajo. Dicho esto, se determinaron 71 y 72 pits para el caso B1 y B2, respectivamente. El detalle de la distribución de estos pits se encuentra en los gráficos pit by pit presentes en el Anexo G.

En las Tablas 21 y 22 se presenta la información correspondiente al primer y último pit, respectivamente obtenidos en Studio NPVS.

Tabla 21. Comparación de características del primer pit en Studio NPVS (Caso B)

PRIMER PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	0.27	0.024	0.024	0.000	0.729	1.020
Caso B1	0.27	0.024	0.024	0.000	0.729	1.020
Caso B2	0.27	0.024	0.024	0.000	0.729	1.020

Tabla 22. Comparación de características del último pit en NPVS (Caso B)

ULTIMO PIT	PIT	RF	Roca Total Mt	Mineral Mt	Estéril Mt	Beneficio MUS\$	Ley de Cu %
Caso A	72	1.00	838.53	489.936	348.594	1,907.626	0.404
Caso B1	72	1.00	758.307	433.913	324.394	1,783.342	0.409
Caso B2	72	1.00	885.149	536.318	348.831	2,026.340	0.398

De la Tabla 21, se observa que Studio NPVS no presenta variaciones al hacer cambios en la pendiente del talud.

En cuanto a la información del último pit, se observan situaciones distintas para cada caso, respecto al primer caso de estudio. Para el caso B1, al disminuir el ángulo de inclinación, todos los demás parámetros se reducen también, exceptuando la ley de cobre. Caso contrario ocurre con el caso B2, que al aumentar el ángulo de inclinación del talud, la cantidad de roca total y mineral se incrementan, mientras que el estéril disminuye, provocando un alza de un 6.2% en el beneficio del pit.

5.2 Fases

Para la elaboración de las fases en este segundo caso de estudio, en todos los softwares solo se considerará una definición para un escenario de 3 fases, con el fin de verificar cambios en cuanto al tonelaje y en el diseño de cada una.

5.2.1 Vulcan “By Cutoff”

Siguiendo la misma metodología aplicada en el primer caso de estudio, en la Figura 41 se presentan los resultados obtenidos respecto a los tonelajes de mineral y de estéril, tanto para los nuevos casos de estudio como con el caso A.

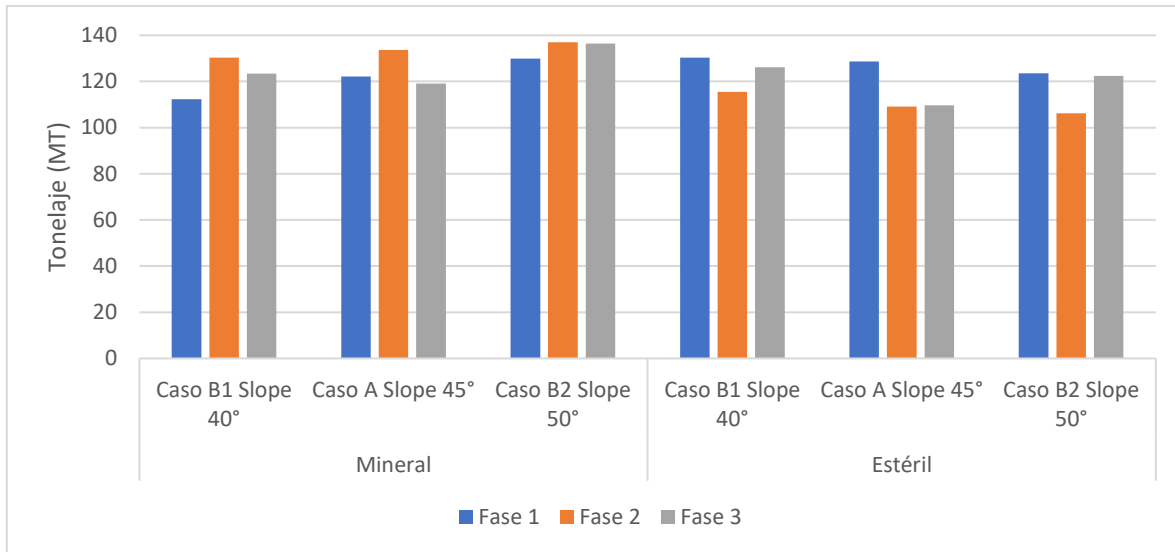


Figura 41. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Vulcan “By Cutoff” (Caso B)

De la Figura adjunta, se observa que al variar los ángulos del talud no se observan diferencias muy significativas respecto a cada fase. Sin embargo, se evidencia que para este método de valorización de bloques, para un ángulo de talud de 45° y 50°, se extrae una mayor cantidad de estéril que de mineral en casi todas las fases, caso contrario ocurre al disminuir la inclinación del talud a 40°, donde el comportamiento entre estéril y mineral por fase es errático.

Respecto a la visualización de las fases, en las Figuras 42 y 43, se presentan las vistas en planta y del perfil Este 2568 respectivamente, para los tres casos expuestos.

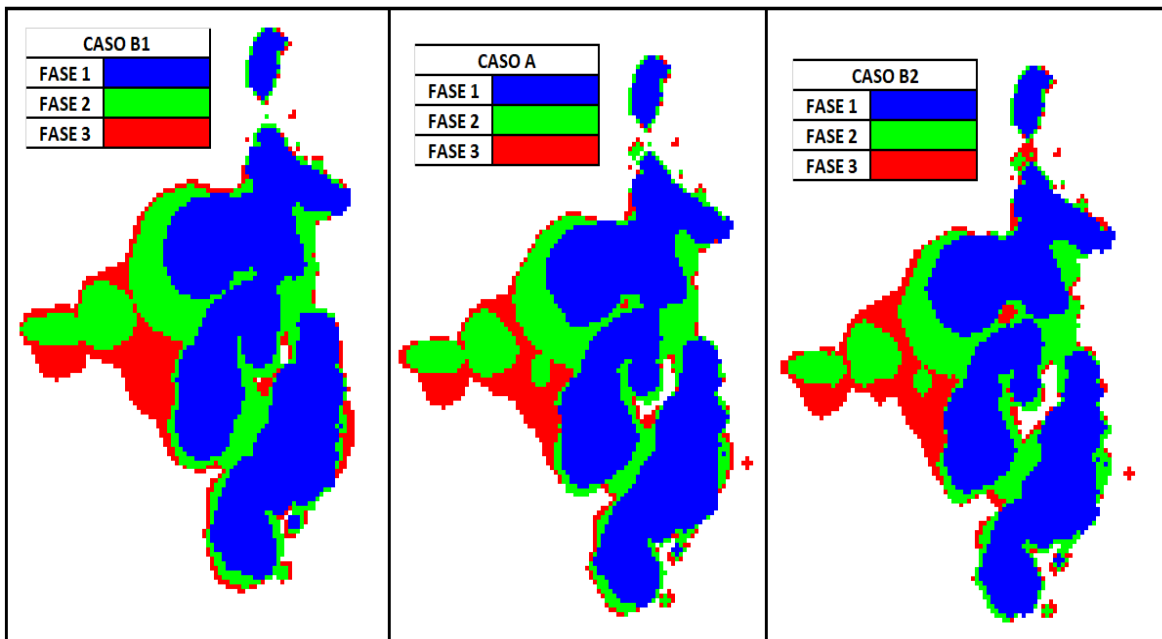


Figura 42. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Cutoff” (Caso B)

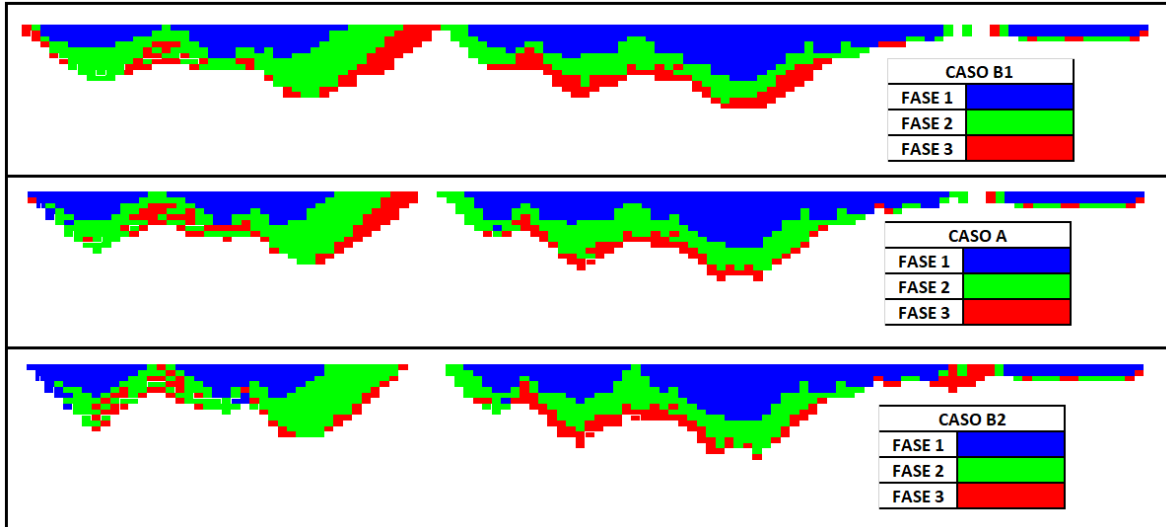


Figura 43. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Cutoff” (Caso B)

De la información entregada de la vista planta de los 3 casos, se aprecia que no existen diferencias geométricas en el espacio que ocupa cada fase al variar el ángulo de inclinación del talud. Respecto a la visualización de perfil, se observa claramente la pronunciación de los ángulos de talud en cada caso, donde a medida que aumenta la inclinación el pit se hace cada vez más profundo.

5.2.2 Vulcan “By Revenue”

Para esta etapa de definición de fases, se siguió la misma metodología indicada en el primer caso de estudio. Dicho lo anterior, en la Figura 44 se presentan los resultados obtenidos respecto a los tonelajes de mineral y estéril para los tres casos de estudio.

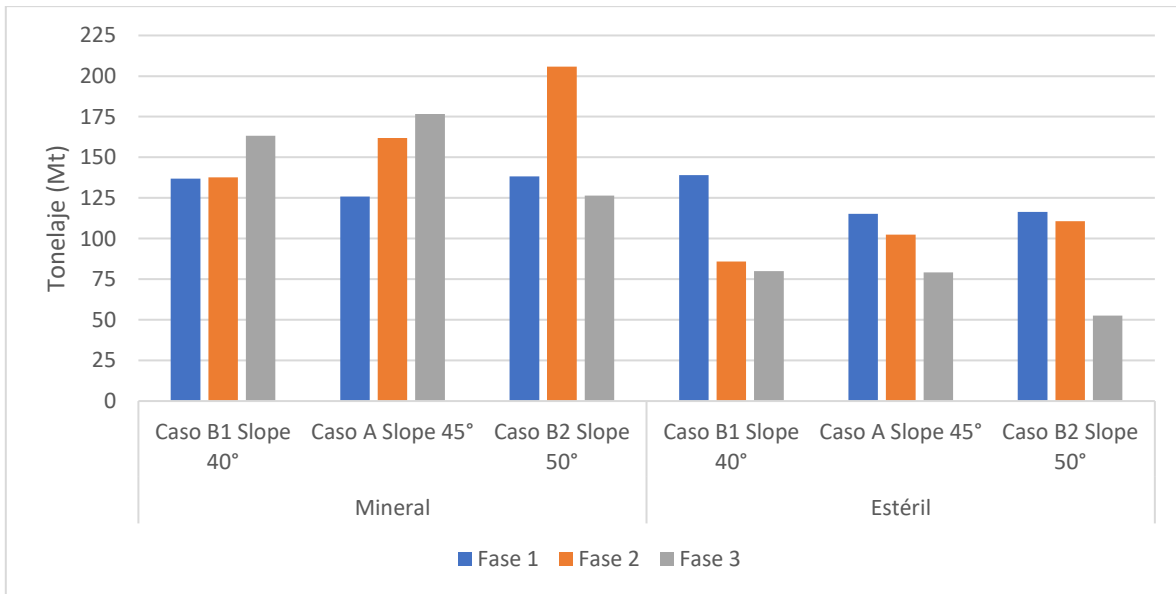


Figura 44. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Vulcan “By Revenue” (Caso B)

De la información del gráfico presentado, se observa una gran diferencia entre la cantidad de mineral, para cada fase y para cada caso de estudio, respecto a la cantidad de estéril, lo que podría indicar un mayor beneficio en términos de VAN al momento de realizar un plan de producción con este método de valorización de bloques que con el método “By Cutoff”.

Respecto a la visualización de las fases, en las Figuras 45 y 46, se presentan las vistas en planta y del perfil Este 2568 respectivamente para cada caso de estudio.

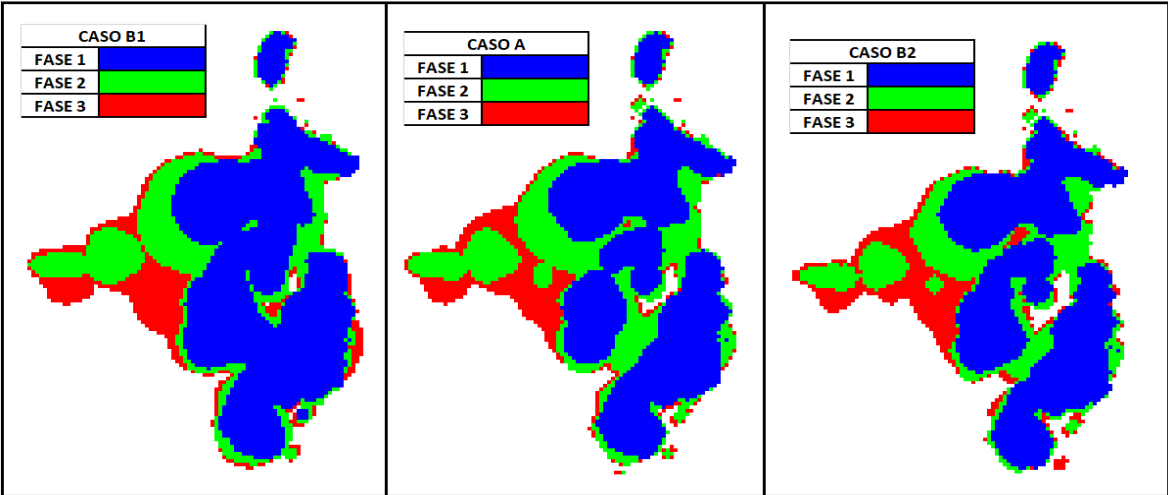


Figura 45. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Revenue” (Caso B)

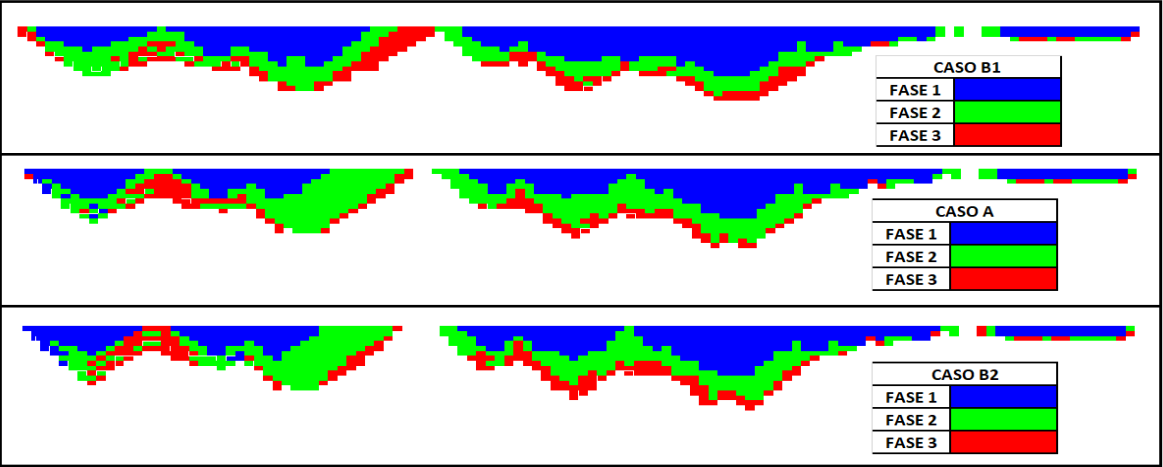


Figura 46. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Vulcan “By Revenue” (Caso B)

De las Figuras adjuntas, se observa que al aumentar la inclinación del talud, existe una reducción en la continuidad física en las primeras dos fases. Respecto a la profundidad en cada caso, sucede lo mismo que con el método “By Cutoff”, a medida que aumenta la inclinación, la profundidad aumenta.

5.2.3 Doppler

Siguiendo la misma metodología automática de selección de fases utilizada en el caso de estudio A, se obtuvieron los resultados presentes en la Figura 47, donde se exponen los tonelajes de mineral y de estéril para los tres casos de estudio.

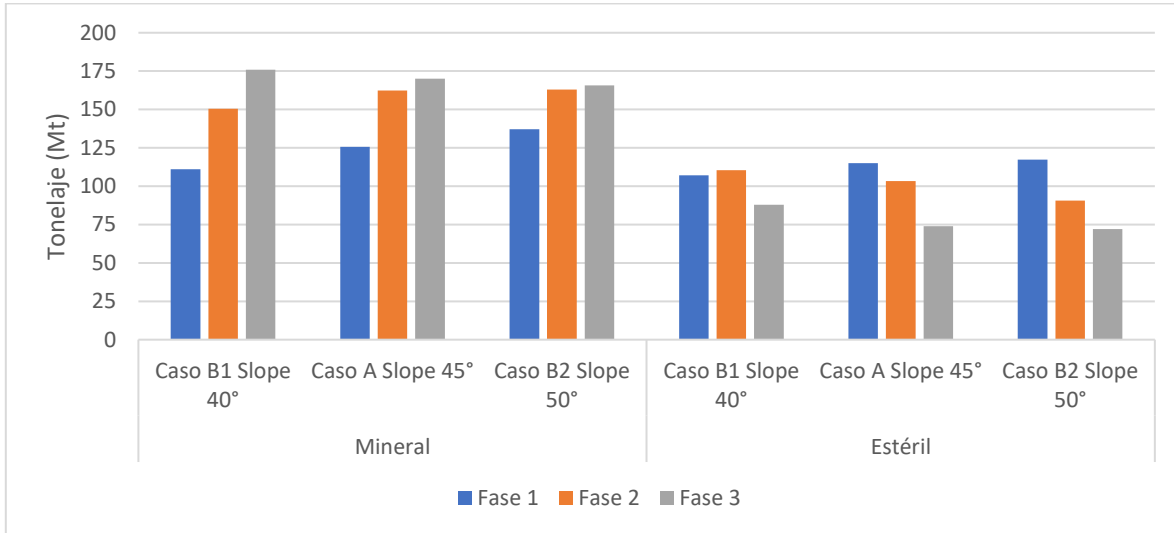


Figura 47. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Doppler (Caso B)

De la Figura se observa que Doppler cumple con el objetivo de mantener similares los tonelajes a extraer entre fases, independientemente del cambio de inclinación del talud, siendo los tres casos similares entre sí.

Respecto a la visualización de las fases, en las Figuras 48 y 49, se presentan las vistas en planta y del perfil Este 2568, respectivamente, para cada caso de estudio obtenidos en Doppler.

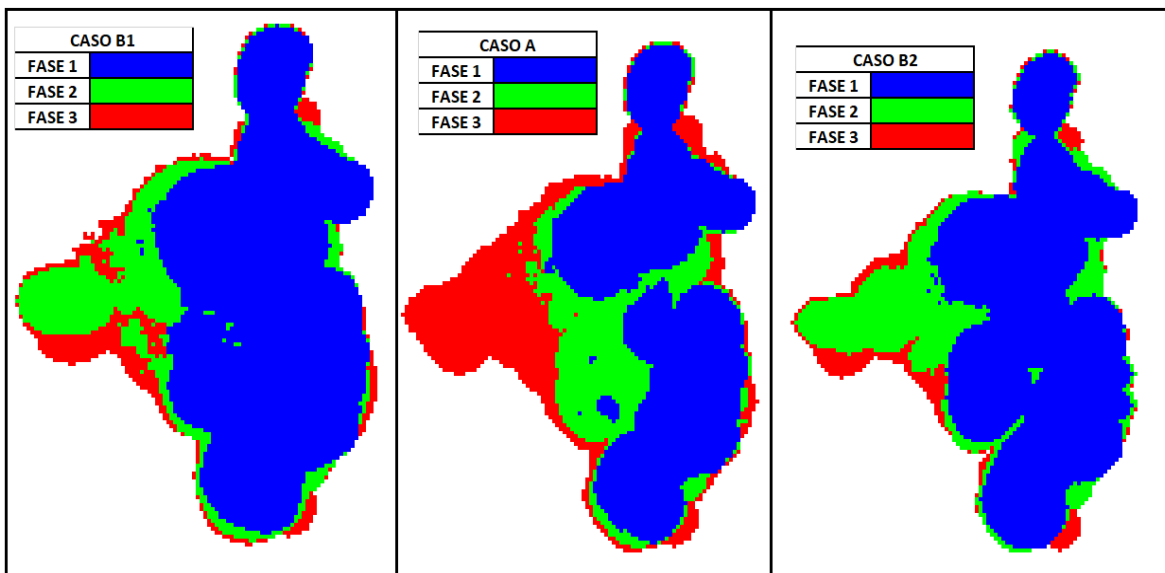


Figura 48. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Doppler (Caso B)

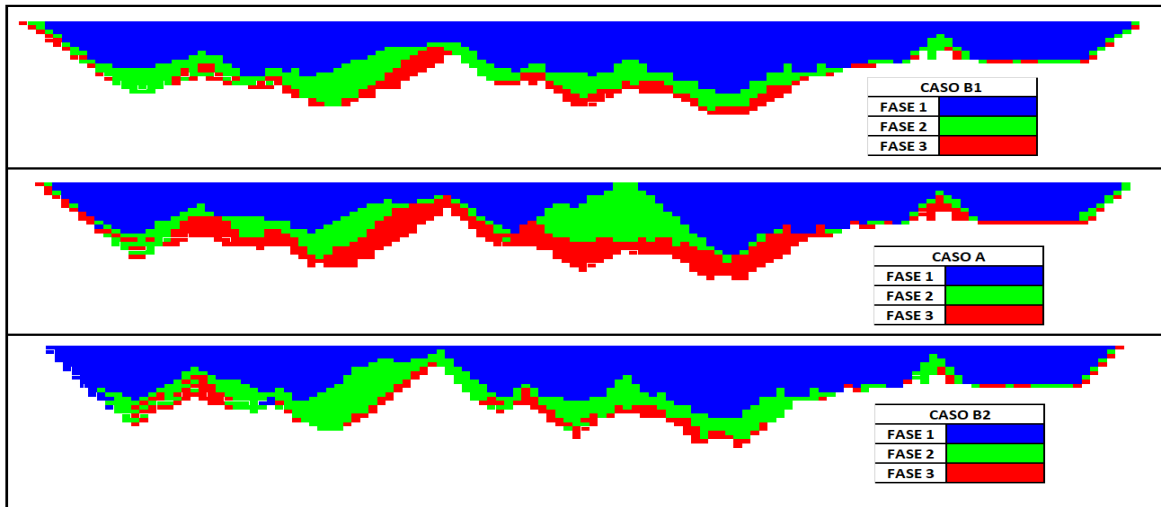


Figura 49. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Doppler (Caso B)

De las Figuras adjuntas se observa un cambio notorio en cuanto al diseño del caso B1 para su primera fase respecto a los otros dos casos. Para el caso A, se aprecia de manera única que la expansión de las fases hacia el Oeste, se realiza en la última fase, mientras que para los otros dos casos, esta se realiza para las segundas fases. Respecto a la profundidad, no se observan diferencias en ningún caso de estudio.

5.2.4 Studio NPVS

En este software, siguiendo la misma metodología utilizada en el caso de estudio anterior, se aplicó un ancho mínimo de 30 metros entre los límites de fases. En cuanto a la configuración total de toneladas de roca, se estableció que para los dos nuevos casos, la primera fase debería extraerse en 240 (MT), la segunda en 250 (MT) y la tercera en 260 (MT).

En la Figura 50 se presentan los resultados obtenidos respecto al tonelaje entre fases tanto de mineral como de estéril para los tres casos de estudio.

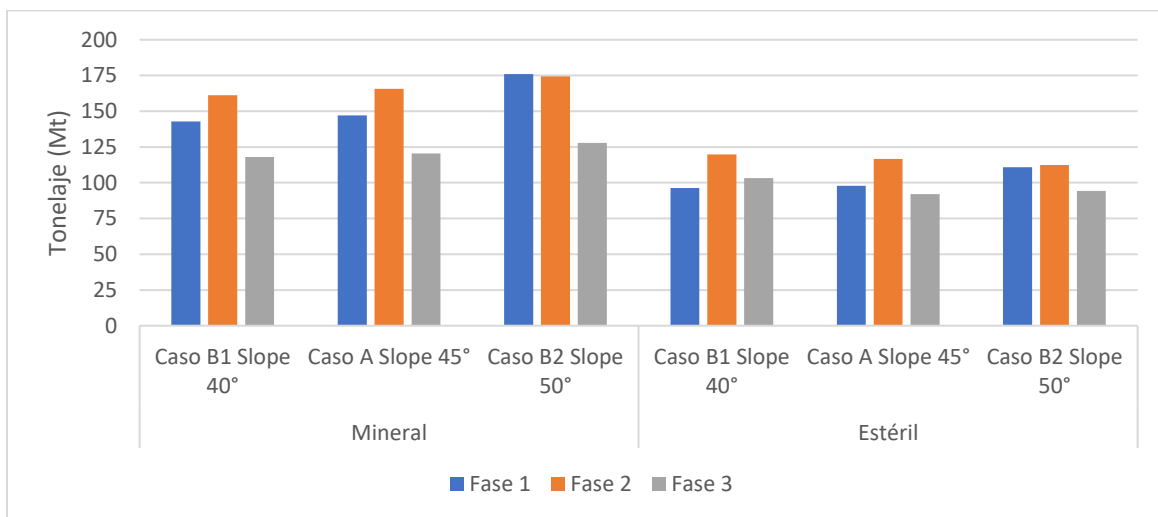


Figura 50. Tonelajes de mineral y estéril en 3 Fases, Studio NPVS (Caso B)

De la Figura, se observa que en cuanto a toneladas de mineral como de estéril no existen diferencias apreciables entre un caso u otro al tomar como variable el ángulo de talud. Además, se evidencia que existe una predominancia por parte del software de asignar una mayor cantidad de mineral que de estéril independientemente del grado de inclinación del talud.

Respecto a la visualización de las fases, en las Figuras 51 y 52, se presentan las vistas en planta y del perfil Este 2568, respectivamente, obtenidos en Studio NPVS.

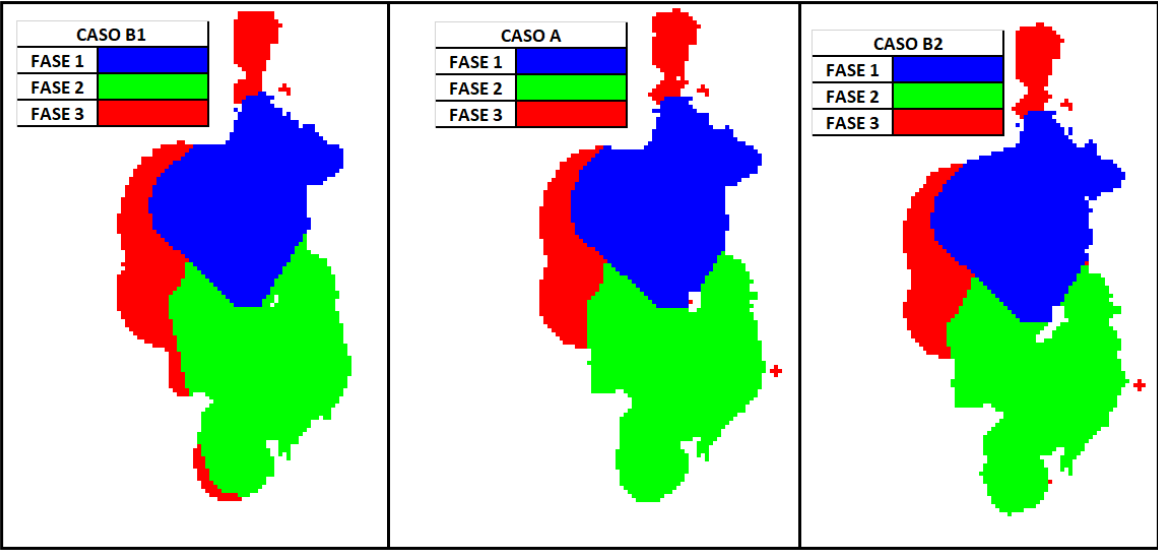


Figura 51. Vista en planta de 3 fases para cada caso de estudio en Studio NPVS (Caso B)

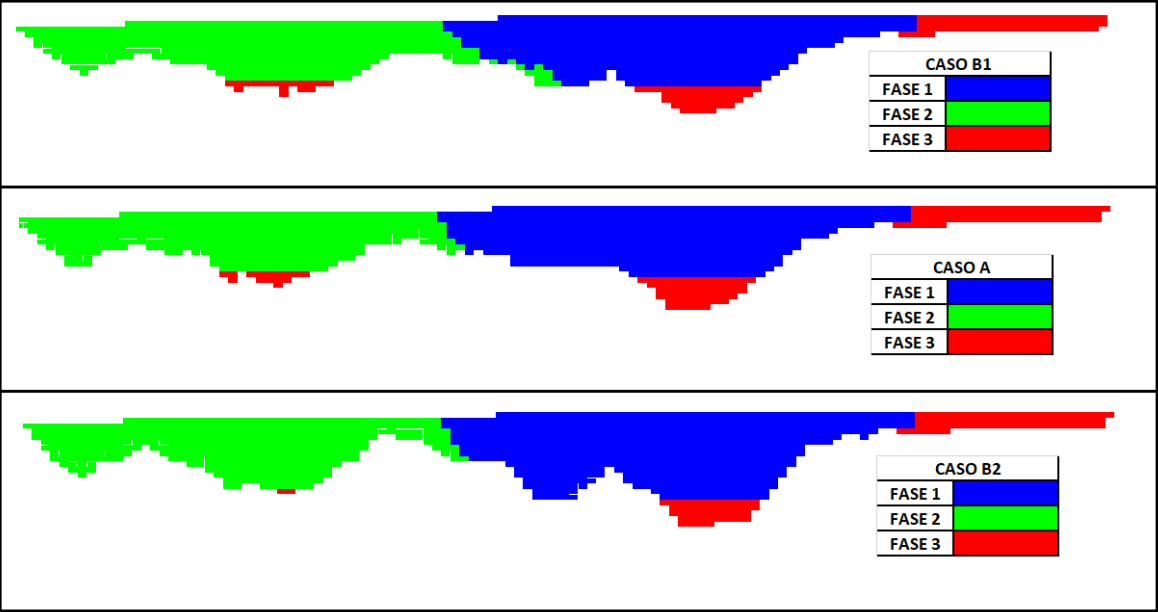


Figura 52. Vista del perfil Este 2568 de 3 fases para cada caso de estudio en Studio NPVS (Caso B)

De acuerdo a las Figuras presentadas, se observa que Studio NPVS es el software que menos varía de acuerdo al diseño de las fases. Comparando los casos B1 y B2 con el primer caso de estudio, se aprecia que nuevamente el software no considera en el diseño matemático de sus fases, el sector ubicado al Oeste del yacimiento.

5.3 Comparación entre casos de estudio y softwares

5.3.1 Pits anidados y Pit final

Al modificar la configuración geométrica de la pendiente del talud en Vulcan, se observa un aumento en la cantidad de material en el pit final, lo que resulta en un aumento tanto en el beneficio para una pendiente mayor como en una disminución para una pendiente menor. En Doppler, ocurre lo contrario, con una disminución en la cantidad total de roca y en el beneficio para ambos casos de estudio. Por último, en Studio NPVS, se observa que la variación del ángulo del talud es directamente proporcional a la cantidad de roca total, mineral y beneficio en el pit final.

5.3.2 Fases

En esta etapa, al cambiar la configuración del ángulo del talud en Vulcan, la principal diferencia con el primer caso de estudio es que, para ambos métodos de valorización de bloques, la profundidad del pit aumenta. En Doppler, hay un cambio en el diseño de las fases al momento de comparar el caso B1 con el primer caso de estudio, lo que provoca un cambio en cuándo existirá una expansión en las fases. Para Studio NPVS, se observa que no existen cambios evidentes, ni en el diseño ni en la cantidad de tonelaje al aumentar o disminuir el ángulo de inclinación del talud.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con el trabajo realizado en la presente memoria, se logró comprobar que a pesar de que todos los softwares siguen una misma metodología a nivel general para poder determinar el pit final, los resultados obtenidos entre cada uno varían respecto a los tonelajes y el beneficio esperado, siendo esta diferencia cercana al 1% en los tres softwares. Vulcan, mediante el método “By Revenue”, fue el software que arrojó el mayor pit final, siguiéndole Doppler y Studio NPVS. En cuanto a la diferencia reportada por cada software, esta se acentúa más en Vulcan dependiendo del método que se utilice para valorizar los bloques, siendo el método “By Cutoff” el caso que más se alejaba de los resultados respecto a los demás softwares.

Respecto a la sensibilidad que tienen los softwares al aplicar alteraciones en los parámetros económicos como el precio, y en los parámetros geométricos como el ángulo de inclinación del talud, se encontró que para pequeñas modificaciones del precio se obtienen resultados más significativos que para modificaciones de los ángulos de inclinación, todo esto respecto a la diferencia de tamaños en el pit final. Siendo Studio NPVS el software que más varió a la hora de efectuar cambios en los dos tipos de parámetros.

En cuanto al método de selección de fases que tiene cada software, Vulcan es el único que no genera fases de manera automática, por lo cual, para llevar a cabo su definición hay que indicarle manualmente en qué pit se termina cada fase.

Ahora, en lo que respecta a la selección automática de fases, Studio NPVS tiene la posibilidad de realizar esta metodología descartando el proceso de generación de pits anidados y la definición de un pit final, reemplazando estos criterios por decisiones ligadas al secuenciamiento en el diseño de cada fase, otorgando libertades al usuario a través de prácticas de prueba y error al definir la cantidad de material a extraerse por cada fase y el espacio operativo entre cada una. Por lo cual, este software cumple con ventajas asociadas al diseño general del pit, lo que se puede seguir desarrollando en la familia de softwares que dispone la empresa Datamine.

Doppler por su parte, reveló que al realizar una selección automática de fases, mantiene los tonelajes, tanto de mineral como de estéril, muy similares entre una fase y otra. Lo anterior, puede generar una ventaja importante frente a los demás softwares en la industria minera al momento de definir una flota de equipos y una dotación de personal en un proyecto minero, puesto que la diferencia de inversión entre cada fase se reduce al aumentar el nivel de ocupación de estos.

En lo relativo a los planes de producción, los mejores resultados se obtuvieron en Doppler, lo que podría esperarse, dado que fue el software que generó una distribución de tonelajes similares entre fases. Sin embargo, al observar las diferencias entre el uso del criterio de Min/Max Lead, se observa que al no agregar la restricción, el software omite el movimiento de material en la última fase en cada escenario propuesto, por lo cual el plan más fidedigno a la hora de realizar esta etapa es considerando el criterio. De manera similar Studio NPVS

reportó sus resultados, respetando en su totalidad la capacidad de procesamiento a lo largo de todos los periodos, sin embargo, no respeta los límites de la capacidad mina que se le indica. Lo anterior se debe a que el software realiza un Pre-Stripping al inicio de cada plan de producción generado con el fin de cumplir en cabalidad con la capacidad mina, reduciendo la cantidad de estéril a repartirse en los periodos restantes, pero no de manera constante, puesto que, en varios periodos incluso, llegó a superarse el límite indicado por la capacidad mina.

Por otro lado, los planes de producción arrojados en los tres softwares revelaron que a pesar de que sí se respetan los límites de capacidades indicados, a excepción de Studio NPVS, existen alteraciones en los tonelajes de estéril y de mineral periodo a periodo. Se observó en todos los softwares que, a pesar de privilegiar la capacidad de procesamiento, se deja de lado la capacidad mina, lo cual puede ser perjudicial respecto al CAPEX de un proyecto minero, debido a la incertidumbre de cuánto capital invertir para cada periodo.

De acuerdo con lo expuesto, se puede concluir que la usabilidad de cada software respecto a las labores computacionales mineras, si bien, entregan resultados similares entre sí para cada etapa, estos siempre estarán sujetos a los criterios particulares de cada software, generando diferencias. Sin embargo, todos cumplen con su labor en cuanto a la planificación de largo plazo.

Por otra parte, este trabajo se limitó a la no operativización del pit, por lo cual, los resultados obtenidos pueden variar sustancialmente al momento de operativizar los resultados arrojados en cada software.

Es por lo mismo que, para futuros trabajos se recomienda realizar la operativización del pit y repetir la metodología para la definición de fases y generación del plan de producción, con el fin de poder compararlo con el trabajo no operativizado y determinar las principales diferencias que puedan arrojar los softwares entre cada uno.

Además, respecto al trabajo del pit final, se recomienda realizar más pruebas al momento de variar la pendiente del talud, para asegurarse de si existe o no una tendencia al aumentar o disminuir el ángulo de inclinación. Siguiendo esta misma línea, se recomienda determinar otras variables, además de lo desarrollado en este trabajo, cuáles pueden ser las que más afecten al pit final en términos de tamaño y beneficios.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMTC. (2021). *Transformación digital en la mediana y pequeña minería chilena*. Advanced Mining Technology Center.

Castillo, E. I. (2019). *Aplicación del agendamiento directo de bloques como guía para la selección de fases*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/174833>

Castro, N. (2022). *Comparación de herramientas de software en la definición de reservas y plan de producción para cielo abierto*. Universidad de Concepción.

Chicoisne, R., Espinoza, D., Goycoolea, M., Moreno, E., & Rubio, E. (2012). A New Algorithm for the Open-Pit Mine Production Scheduling Problem. *Operations Research*, 60(3), 517-528. <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1050>

Cullenbine, C., Wood, R. K., & Newman, A. (2011). A sliding time window heuristic for open pit mine block sequencing. *Optimization Letters*, 5(3), 365-377. <https://doi.org/10.1007/s11590-011-0306-2>

Datamine. (2020). *Studio NPVS, Studio RMS, Studio MAXIPIT, Sistema Completo para Planificación Estratégica*.

DELPHOS. (s.f.). *Delphos Open Pit Planner (DOPPLER)*. <https://delphoslab.cl/index.php/software-es/41-delphos-open-pit-planner-doppler>

Díaz, C. A. (2017). *Planificación minera a cielo abierto considerando diseño óptimo de rampas*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146684>

Herrera, J., & Pla Ortiz de Urbina, F. (2006). *Métodos de Minería a Cielo Abierto* (J. Herrera Herbert, Ed.). E.T.S.I. Minas (UPM). <http://www.minas.upm.es>

Jiménez Del Valle, B. (2014). *Criterios de definición de fases y diseño en minería a cielo abierto*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131813>

Johnson, T. B. (1968). *Optimum Open Pit Mine Production Scheduling - ProQuest*. <https://www.proquest.com/openview/0b169cc6806c927fad67dbce6d5e3392/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>

Loor, V. E. (2020). *Aplicación de inteligencia artificial para el agendamiento y optimización del diseño de fases en minería a cielo abierto*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179778>

Maptek. (2015). *Maptek Vulcan-Pit Optimiser*.

Meneses, D. (2022). *Planificación minera a cielo abierto considerando incertidumbre del precio de producto final: Un enfoque mediante opciones*. <https://delphoslab.cl/index.php/blogs/103-planificacion-minera-a-cielo-abierto-considerando-incertidumbre>

Minería Chilena. (2014, enero 2). *Software para minería: Herramientas para disminuir la incertidumbre*. Minería Chilena.

Ministerio de Minería, B. del C. (2004). *DECRETO 132 | APRUEBA REGLAMENTO DE SEGURIDAD MINERA*. www.bcn.cl/leychile. <https://bcn.cl/2f7bv>

Recalde, E., & Morante, F. (2009). *DSpace en ESPOL: Metodología de planificación minera a corto plazo y diseño minero a mediano plazo en la cantera pifo*. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/218>

Rendu, J.-M. (2014). *An Introduction to Cut-off Grade Estimation, Second Edition*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Rodríguez, M., & Mancilla, D. (s. f.). *Manual DOPPLER (Delphos Open Pit Planner) v2.0*. <https://delphoslab.cl/index.php/software-es/manuales/303-doppler-v2>

Ryan, T. M., & Pryor, P. R. (2000). *Designing Catch Benches and Interramp Slopes*.

Shava, P. R. (2018). *An economic evaluation of the Rosh Pinah polymetallic deposit using the net smelter return model*. Doctoral dissertation, University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment.

Troncoso, S. H. (2006). *Simulación del Impacto de Interferencias Operacionales para la Planificación de Producción*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104438>

Vargas, M. A. (2011). *Modelo de Planificación Minera de Corto y Mediano Plazo Incorporando Restricciones Operacionales y de Mezcla*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102670>

8 ANEXOS

A. Variación porcentual de la sensibilidad del precio por cada software

Tabla 23. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Vulcan para ambos métodos de valorización de bloques

Software	Variabilidad %	-5%	-3%	-1%	Precio Base	+1%	+3%	+5%
	Precio US\$/lb	2.66	2.72	2.77	2.80	2.83	2.88	2.94
Vulcan "By Cutoff"	Roca Total Mt	634.56	728.86	776.94	804.32	822.84	868.62	931.88
	Diferencia %	-21.11	-9.38	-3.40	-	2.30	7.99	15.86
	Mineral Mt	310.65	363.63	395.48	413.47	428.81	459.82	502.20
	Diferencia %	-24.87	-12.05	-4.35	-	3.71	11.21	21.46
Vulcan "By Revenue"	Roca Total Mt	720.48	782.67	820.64	848.38	900.17	936.9	1,043.45
	Diferencia %	-15.08	-7.75	-3.27	-	6.10	10.43	22.99
	Mineral Mt	423.57	469.71	500.57	521.00	558.4	589.86	663.26
	Diferencia %	-18.70	-9.84	-3.92	-	7.18	13.22	27.31

Tabla 24. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Doppler

Software	Variabilidad %	-5%	-3%	-1%	Precio Base	+1%	+3%	+5%
	Precio US\$/lb	2.66	2.72	2.77	2.80	2.83	2.88	2.94
Doppler	Roca Total Mt	720.32	781.7	819.22	843.37	901.51	936.17	1,039.40
	Diferencia %	-14.59	-7.31	-2.86	-	6.89	11.00	23.24
	Mineral Mt	421.95	467.14	499.11	518.04	557.59	589.76	659.33
	Diferencia %	-18.55	-9.83	-3.65	-	7.63	13.84	27.27

Tabla 25. Variaciones porcentuales del análisis de sensibilidad realizado en Studio NPVS

Software	Variabilidad %	-5%	-3%	-1%	Precio Base	+1%	+3%	+5%
	Precio US\$/lb	2.66	2.72	2.77	2.80	2.83	2.88	2.94
Studio NPVS	Roca Total Mt	603.18	727.43	812.89	838.53	860.87	946.02	1023.99
	Diferencia %	-28.07	-13.25	-3.06	-	2.66	12.82	22.12
	Mineral Mt	354.64	421.6	472.63	489.94	509.61	567.91	619.58
	Diferencia %	-27.62	-13.95	-3.53	-	4.01	15.91	26.46

B. Vistas isométricas de las fases para el método “By Cutoff” Vulcan

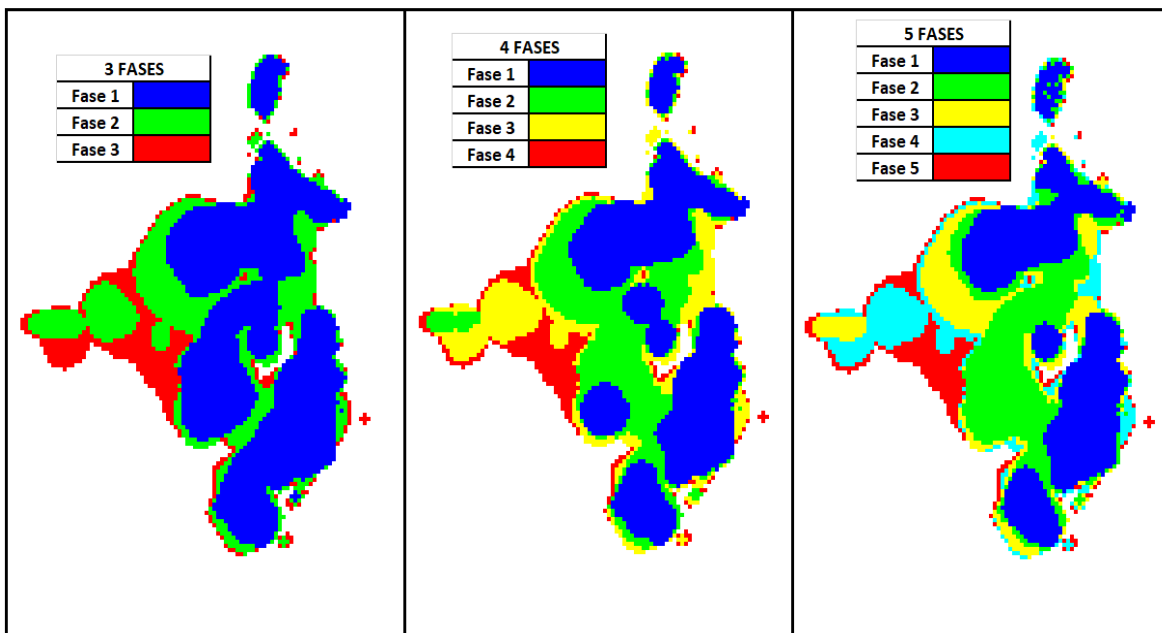


Figura 53. Vista en planta para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Cutoff”, Vulcan

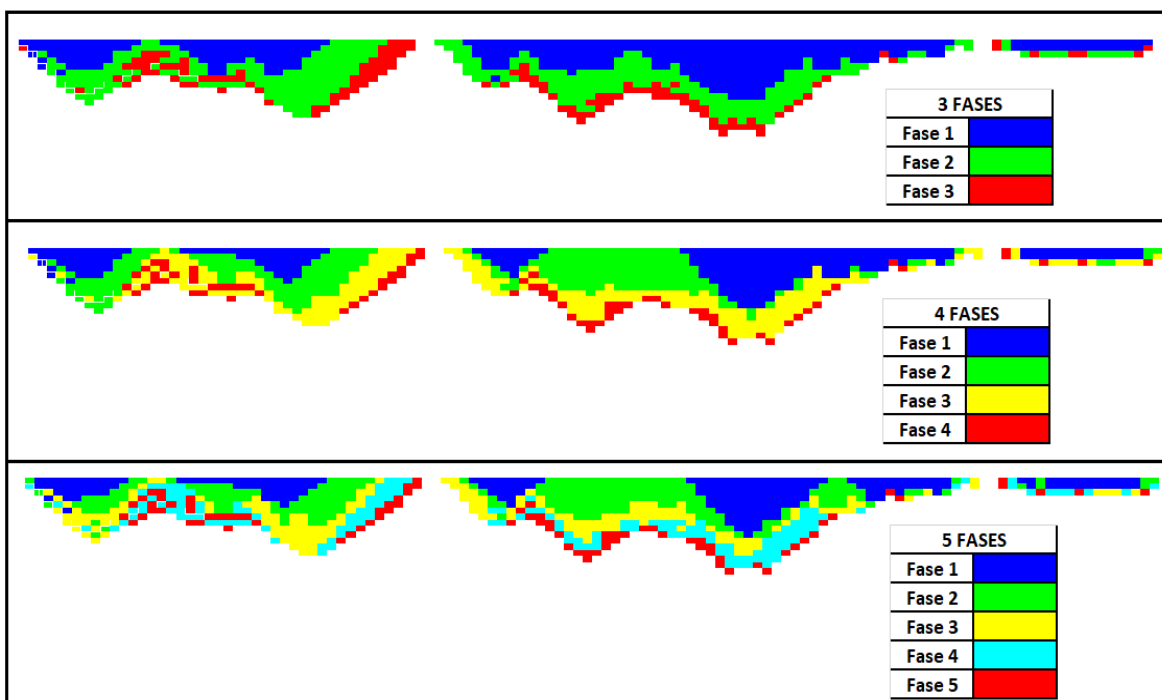


Figura 54. Vista del perfil Este 2568 para los escenarios de 3, 4 y 5 Fases “By Cutoff”, Vulcan

C. Configuración para definición de fases en Studio NPVS (Caso A)

Tabla 26. Cantidad de roca total mínima para cada fase Studio NPVS (Caso A)

	3 Fases	4 Fases	5 Fases
	Roca Total Mt	Roca Total Mt	Roca Total Mt
Fase 1	240	160	160
Fase 2	250	180	180
Fase 3	250	150	160
Fase 4		260	150
Fase 5			250

D. Distribución de toneladas de mineral y estéril por fase para cada software (Caso A)

Tabla 27. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Vulcan “By Cutoff”

Escenario	Material	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
3 Fases	Estéril	128,661,431	109,048,819	109,610,709		
	Mineral	122,124,000	133,660,969	119,130,459		
4 Fases	Estéril	87,613,322	94,134,113	74,380,969	91,192,556	
	Mineral	86,985,338	95,320,078	96,722,728	95,887,284	
5 Fases	Estéril	71,385,675	67,535,681	62,730,103	54,476,944	91,192,556
	Mineral	71,952,150	60,834,394	81,418,041	64,823,559	95,887,284

Tabla 28. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Vulcan “By Revenue”

Escenario	Material	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
3 Fases	Estéril	115,247,588	102,501,844	79,153,275		
	Mineral	125,780,316	161,824,959	176,769,563		
4 Fases	Estéril	87,099,038	105,781,256	56,824,294	47,198,119	
	Mineral	99,471,000	141,374,034	119,654,869	103,874,934	
5 Fases	Estéril	70,774,219	70,755,122	56,616,150	51,559,097	47,198,119
	Mineral	79,910,381	86,622,197	84,670,022	109,297,303	103,874,934

Tabla 29. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Doppler

Escenario	Material	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
3 Fases	Estéril	115,089,722	103,238,953	74,001,731		
	Mineral	125,562,234	162,431,859	170,034,488		
4 Fases	Estéril	85,991,119	83,955,797	48,381,759	74,001,731	
	Mineral	97,787,006	103,825,856	86,381,231	170,034,488	
5 Fases	Estéril	70,865,409	67,640,456	60,599,897	51,248,831	41,975,813
	Mineral	79,933,894	75,345,000	95,573,653	108,513,328	98,662,706

Tabla 30. Tonelajes de los tres escenarios de fases en Studio NPVS

Escenario	Material	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
3 Fases	Estéril	97,939,538	116,657,878	91,944,956		
	Mineral	147,188,888	165,683,372	120,482,428		
4 Fases	Estéril	61,940,063	73,991,878	71,420,203	99,190,228	
	Mineral	90,186,450	110,981,306	73,028,016	159,158,916	
5 Fases	Estéril	61,941,413	73,853,653	72,561,909	70,066,753	28,002,994
	Mineral	90,045,872	110,912,409	89,701,153	88,432,744	54,181,838

E. Planes de producción para el método “By Cutoff”, Vulcan

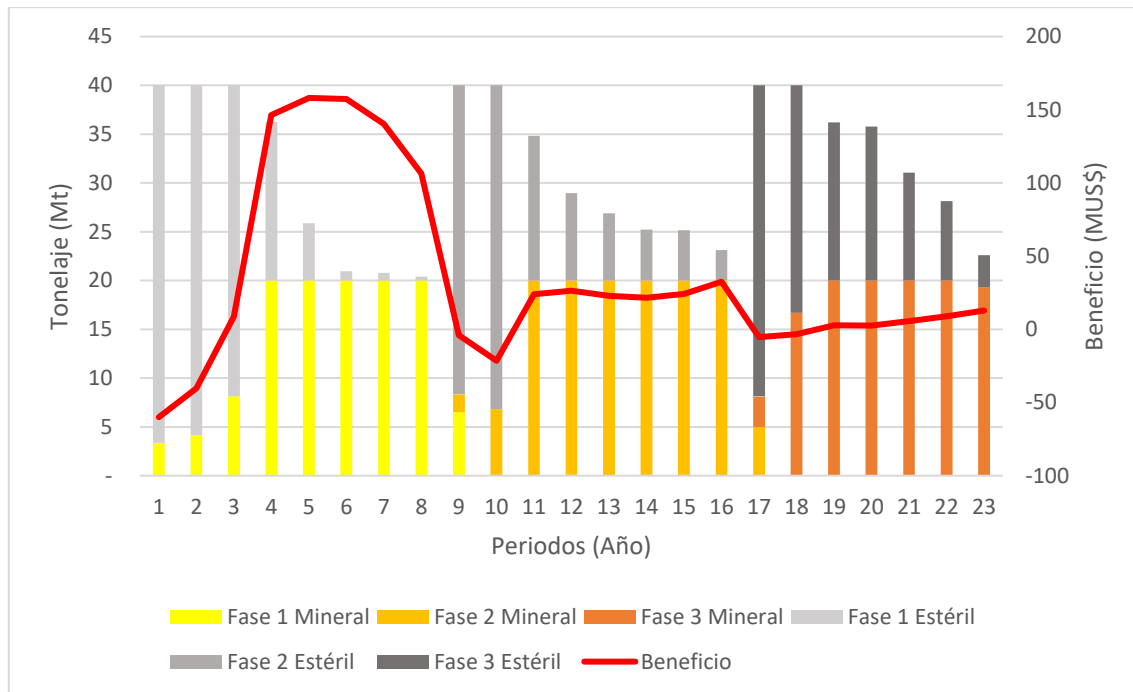


Figura 55. Plan de producción 3 fases “By Cutoff” en Vulcan

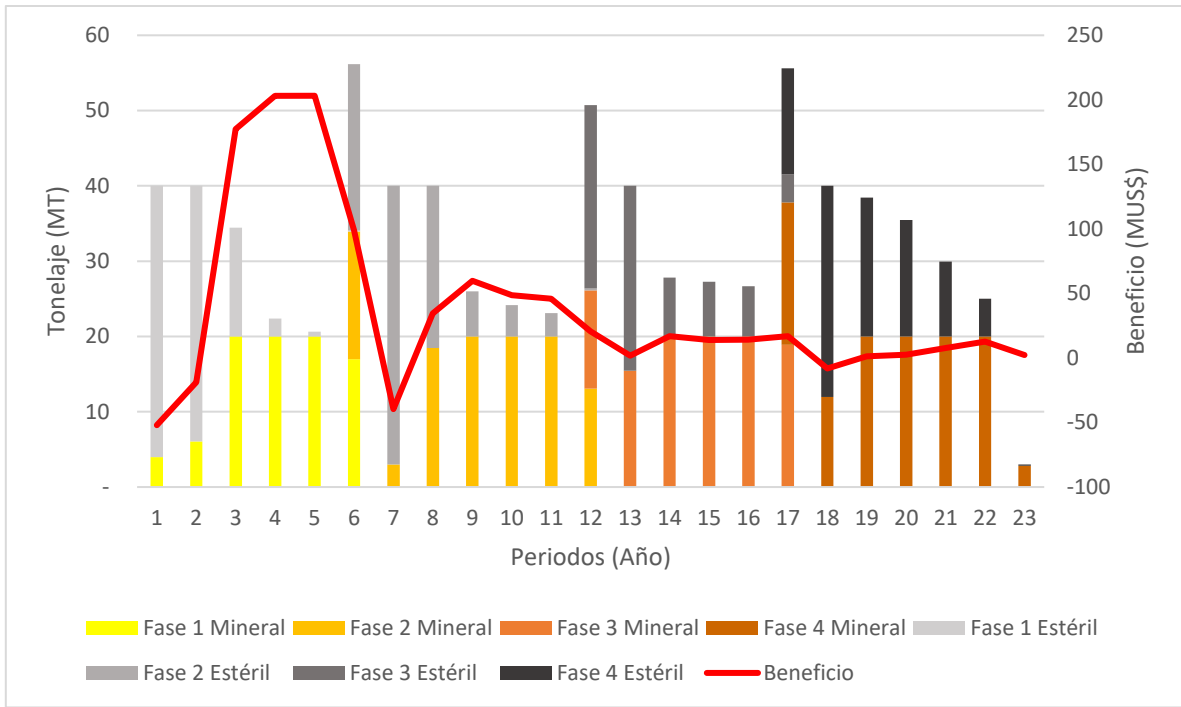


Figura 56. Plan de producción 4 fases “By Cutoff” en Vulcan

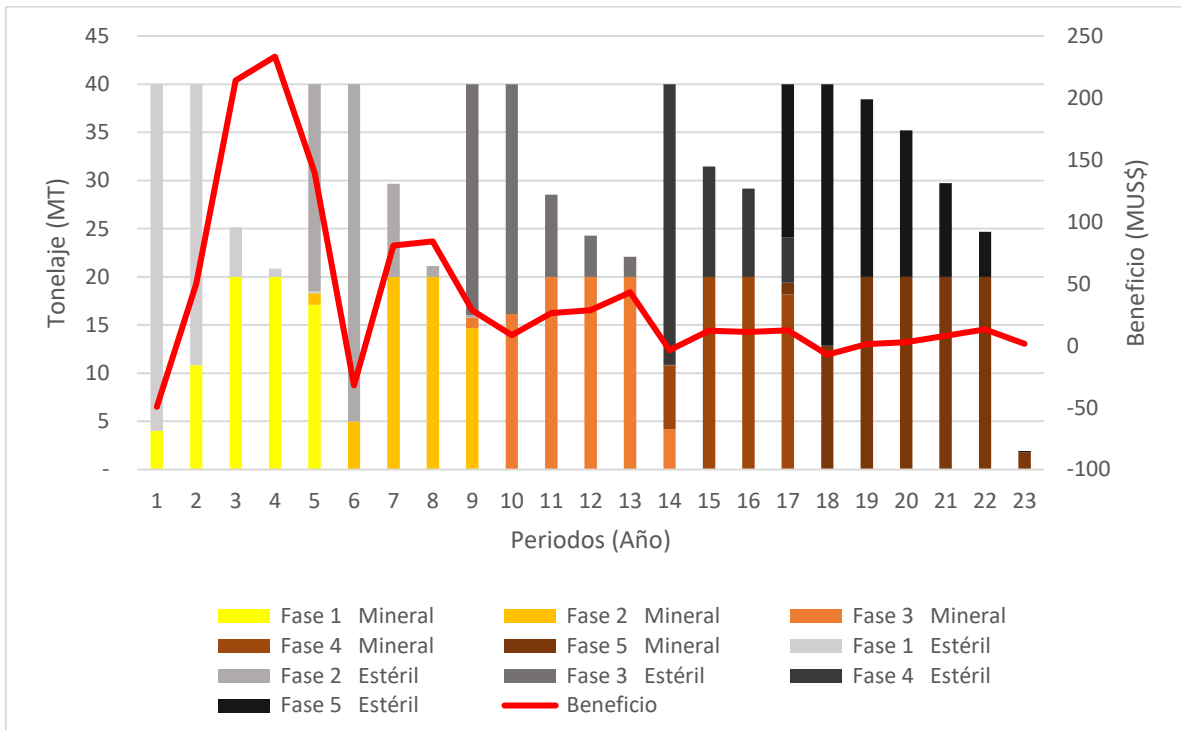


Figura 57. Plan de producción 5 fases “By Cutoff” en Vulcan

F. Especificaciones técnicas de cada hardware

Tabla 31. Especificaciones del hardware utilizado en Vulcan y Studio NPVS

Tipo	Computador de escritorio
Procesador	Intel Core i5-9400F CPU @2.90GHz / 6 núcleos /6 hilos
Memoria RAM	16.0 GB
Gráficos	NVIDIA GeForce GTX 1660 / 6 GB GDDR5 (192 bit)
Disco Duro	SSD 2.5 1 TB

Tabla 32. Especificaciones del hardware utilizado en Doppler

Tipo	Notebook
Procesador	AMD Ryzen 5300U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.10 GHz
Memoria RAM	12.0 GB
Gráficos	AMD Radeon Vega 8 Graphics
Disco Duro	SSD 2.5 1 TB

G. Gráficos Pit by Pit Caso de estudio B

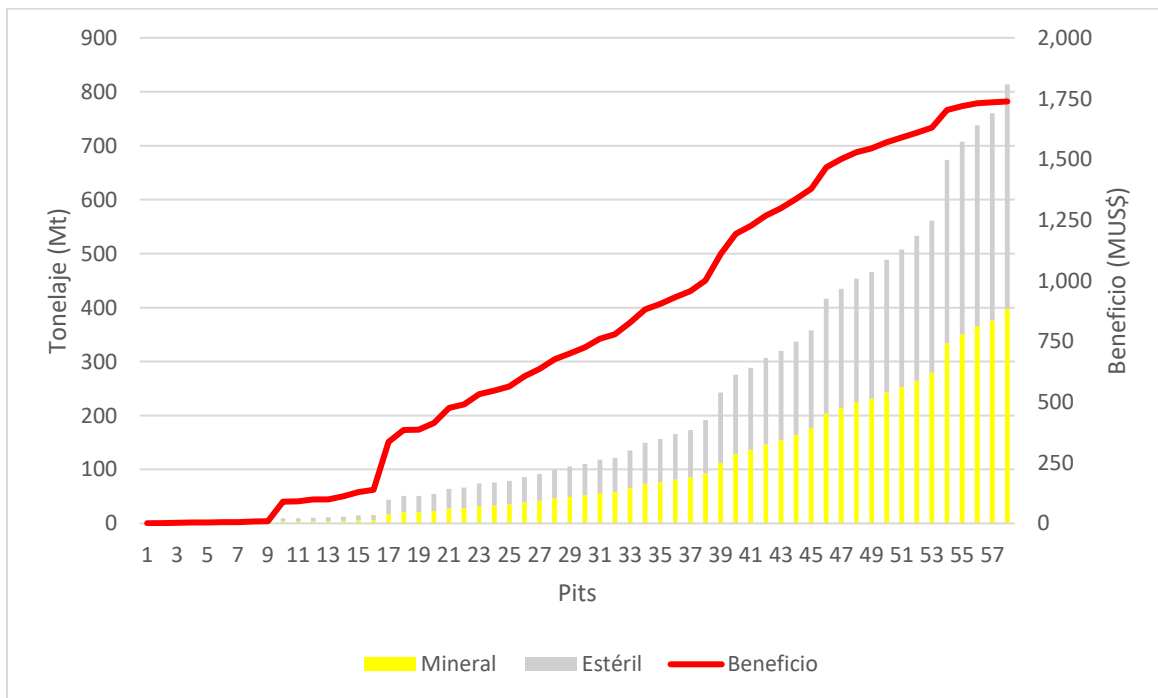


Figura 58. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan “By Cutoff” (Caso B1)

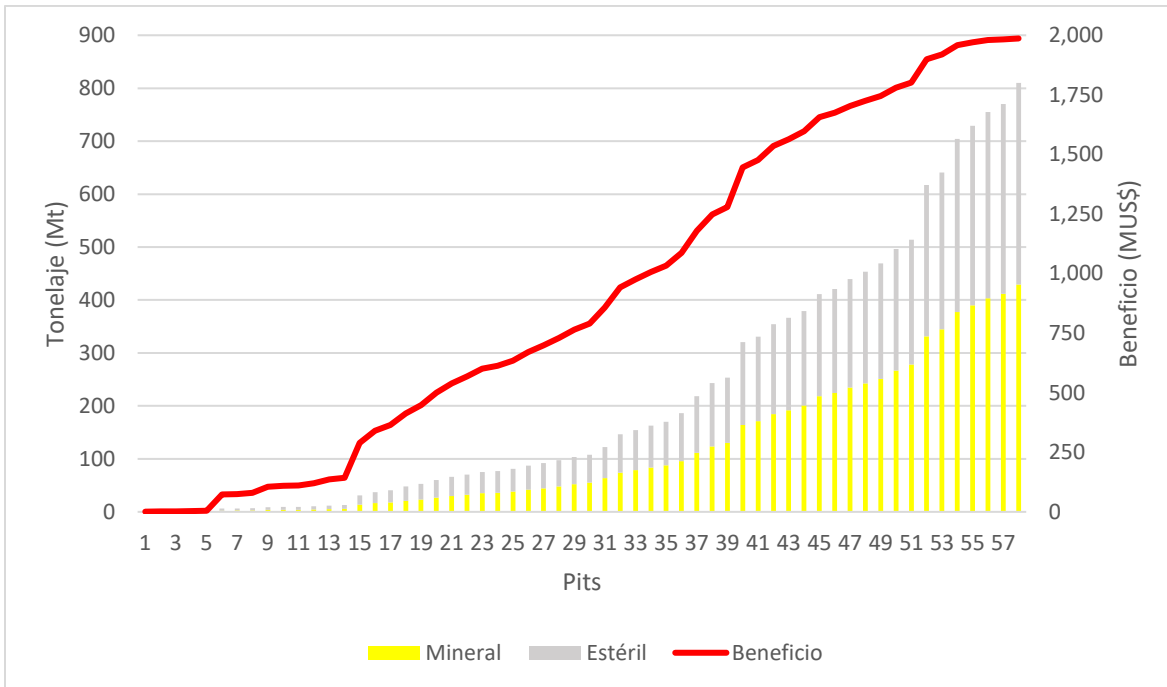


Figura 59. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan "By Cutoff" (Caso B2)

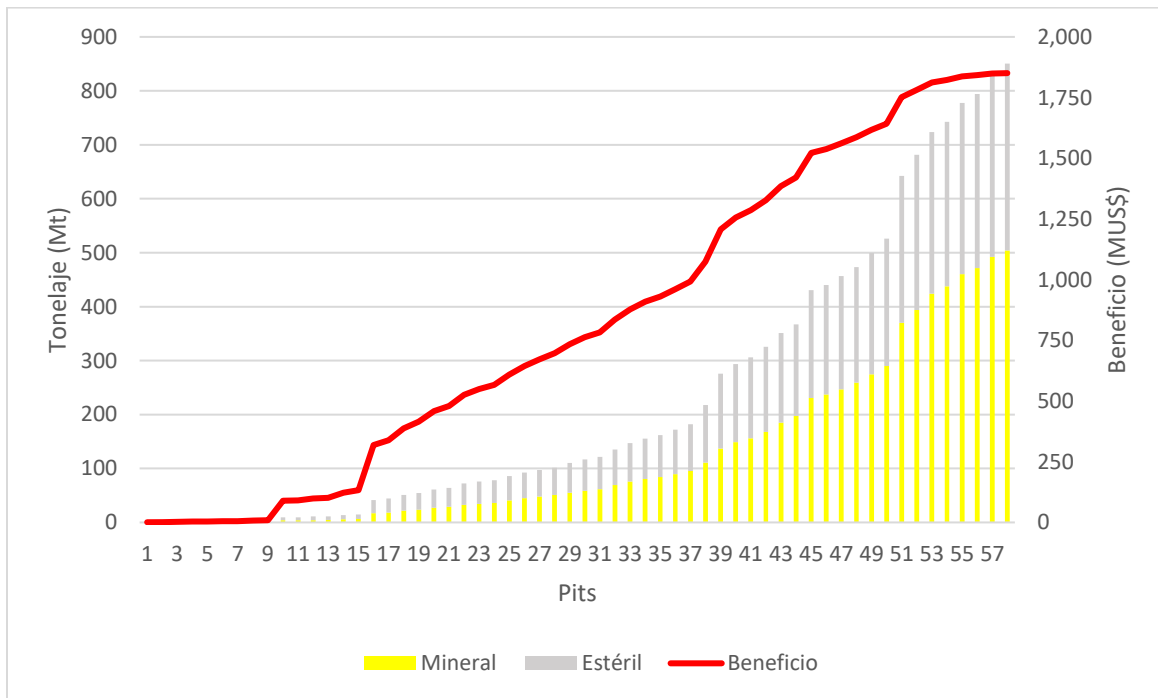


Figura 60. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan "By Revenue" (Caso B1)

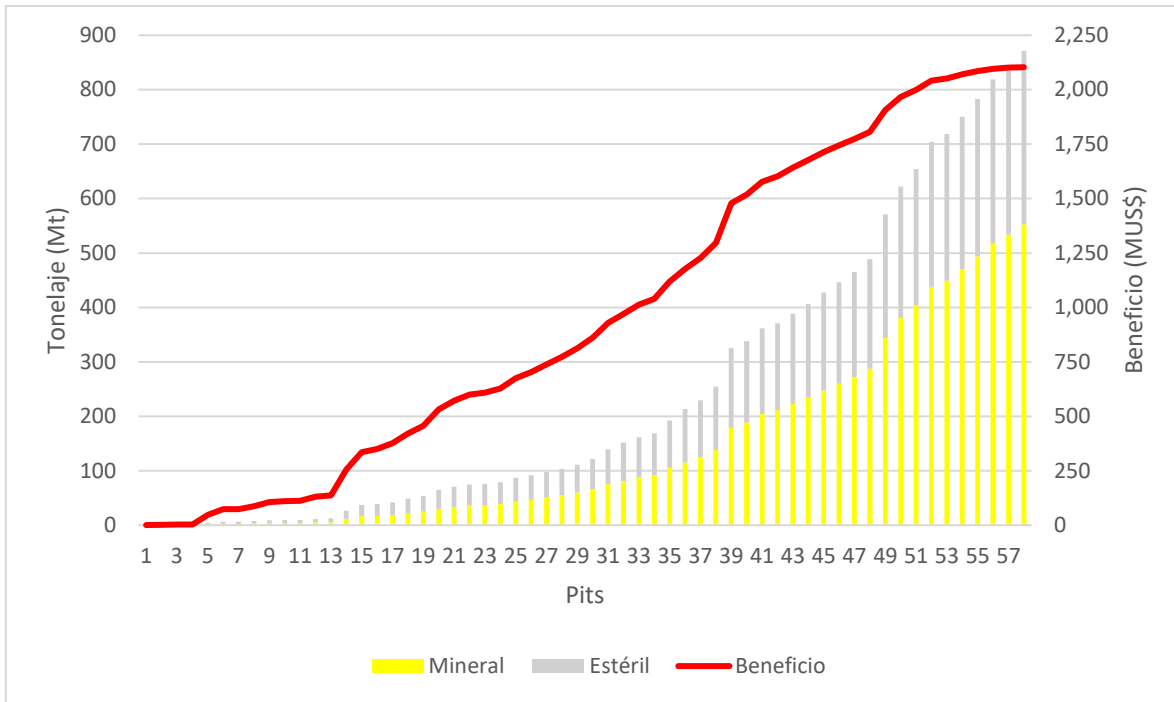


Figura 61. Gráfico Pit by Pit obtenido en Vulcan "By Revenue" (Caso B2)

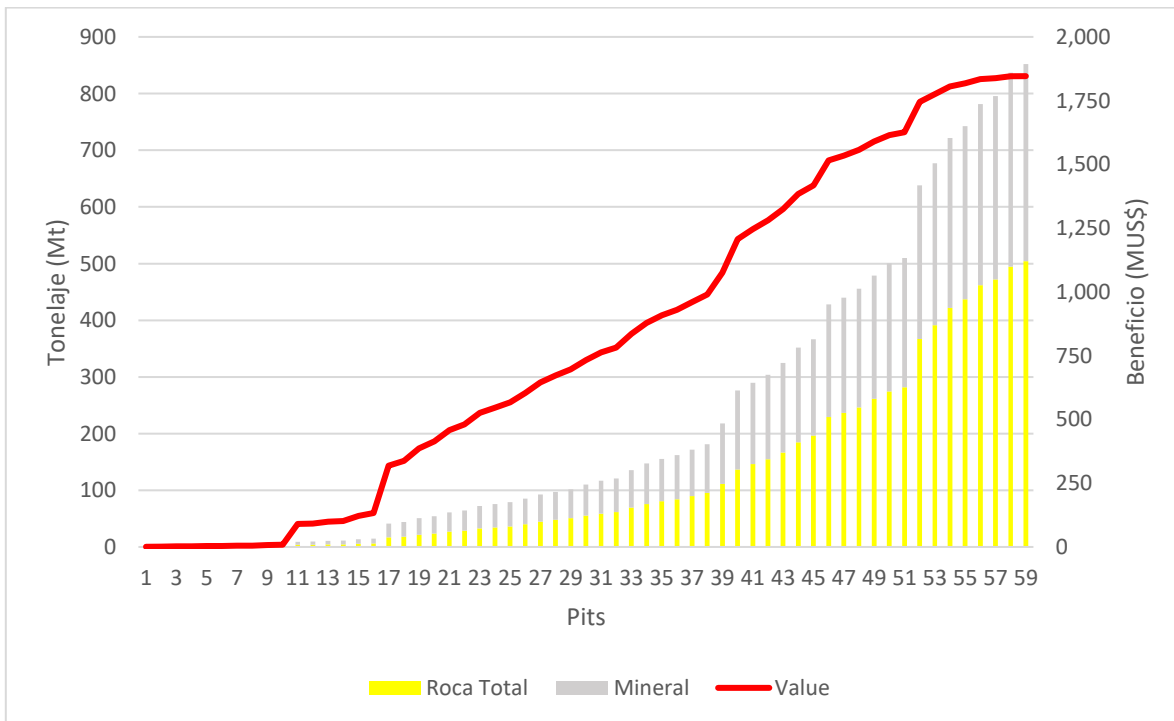


Figura 62. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler (Caso B1)

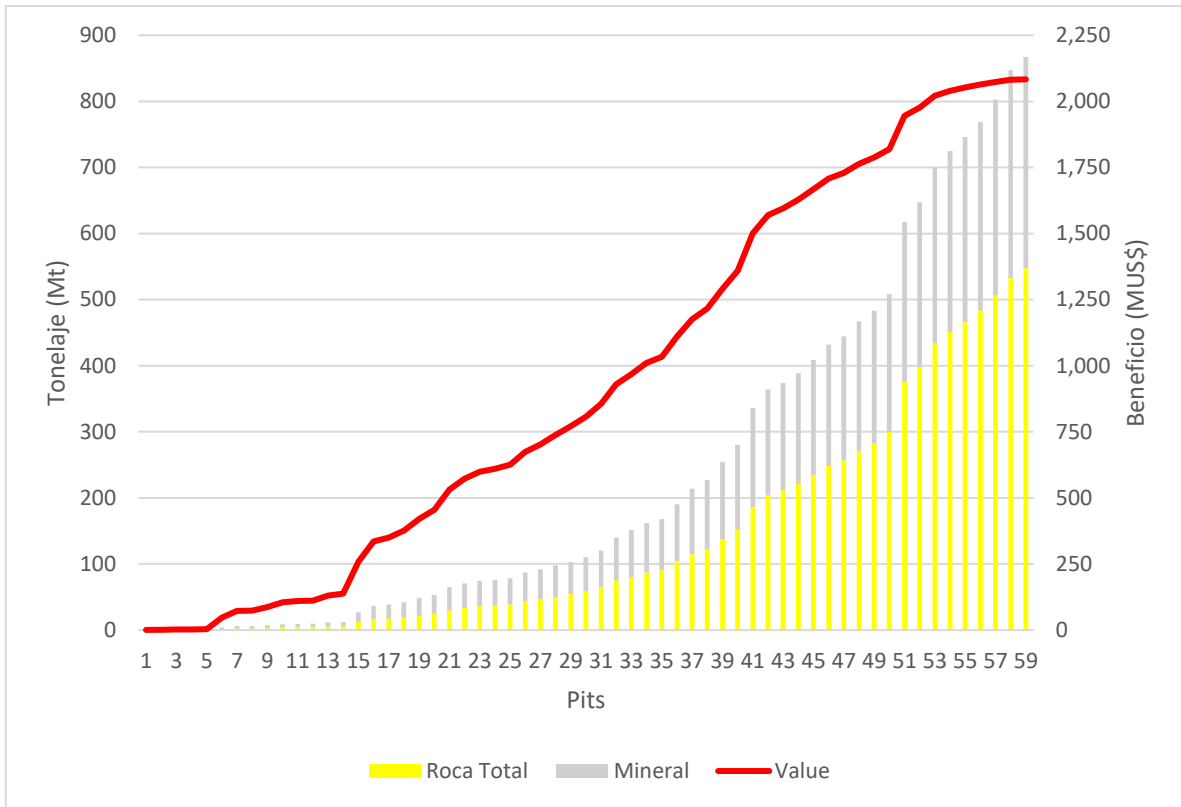


Figura 63. Gráfico Pit by Pit obtenido en Doppler (Caso B2)

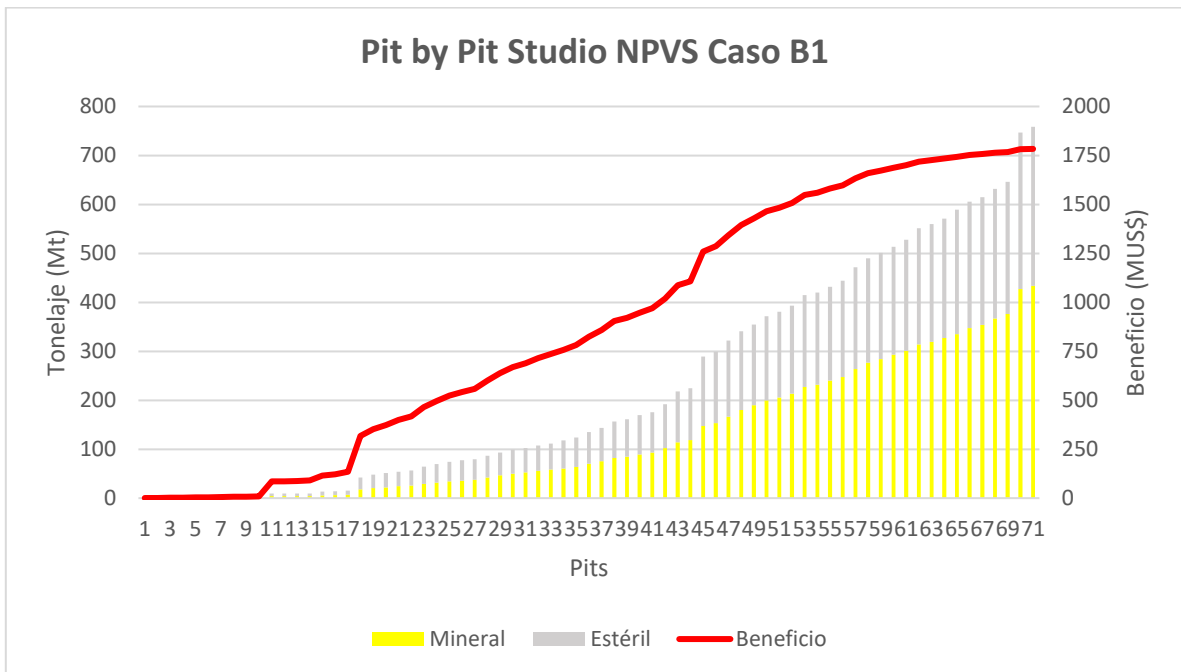


Figura 64. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS (Caso B1)

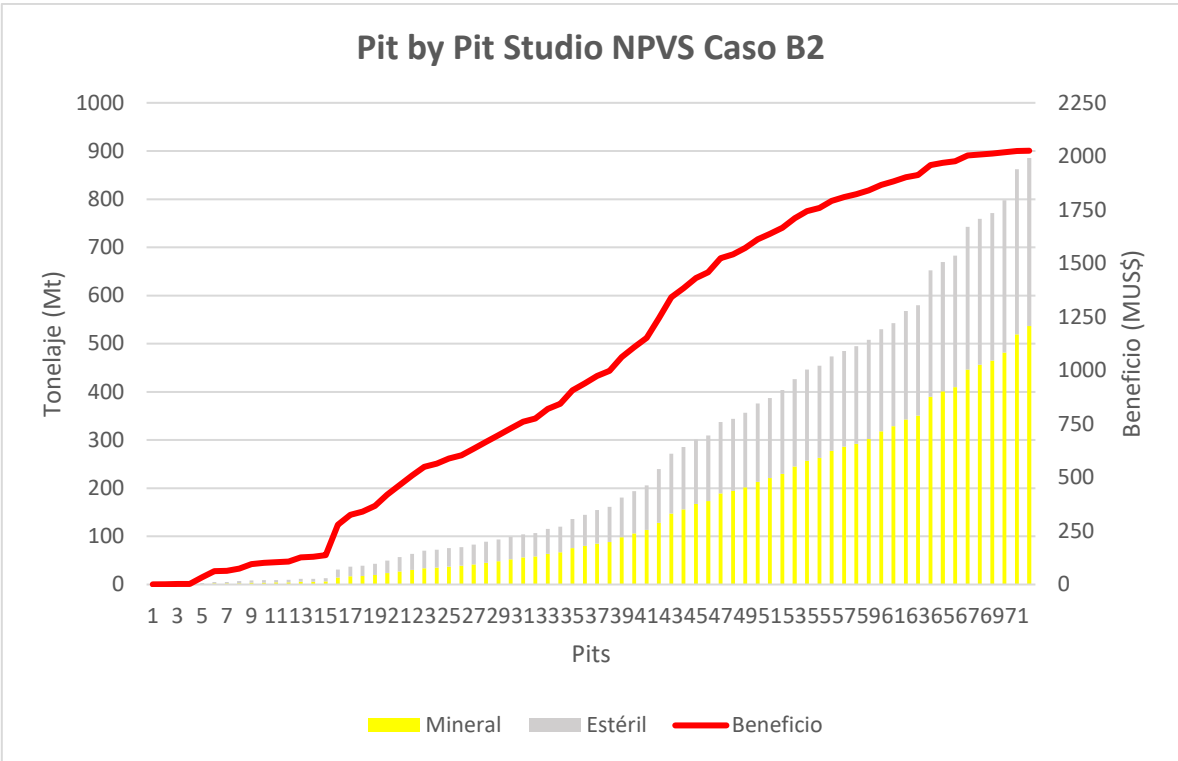


Figura 65. Gráfico Pit by Pit obtenido en Studio NPVS (Caso B2)