UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

TESIS

"OPTIMIZACIÓN DEL PIT FINAL MEDIANTE EL MÉTODO DE FLUJO MÁXIMO PSEUDOFLOW EN UNA UNIDAD MINERA SUPERFICIAL"

PRESENTADO POR:

Bach. Victor Daniel Mamani Laura

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ

2024

Folio N° 041

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:

.....

Fecha: 06 JUNIO 2024

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS ....., TITULADO:

"OPTIMIZACIÓN DEL PIT FINAL MEDIANTE EL METODO DE FLUJO MAXIMO PSEUDOFLOW EN UNA UNIDAD MINERA SUPERFICIAL"

Bachiller: VICTOR DANIEL MAMANI LAURA

Asesor Principal: MGR. JORGE LUIS TOMAS FLOREZ SALAS

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: DIESISEIS (16) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:00 horas, del 6 de JUNIO del año 2024 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
MSc AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MGR JUAN ELIAS ROJAS CONDORI
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Dr. Arquímedes León VARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Victor Daniel Mamani Laura
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por guiarme y darme fuerzas para alcanzar mis objetivos. A mi familia, amigos y mentores, les agradezco profundamente su invalorable apoyo en mi desarrollo personal y profesional.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional de Moquegua, así como a las autoridades, docentes y personal administrativo de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas. Durante mi desarrollo profesional, tuve el privilegio de compartir conocimientos y experiencias que han sido fundamentales para mi crecimiento.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Mgr. Jorge Florez, quien ha sido un mentor excepcional y una fuente constante de guía y sabiduría durante la elaboración de esta investigación. Su compromiso y apoyo han sido fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos. Asimismo, quiero agradecer al Mg. Jasson Carrasco por proporcionarme las bases necesarias para iniciar esta investigación. Su dedicación y mentoría fueron cruciales para el éxito de este trabajo.

Además, deseo extender mi sincero agradecimiento a mi familia y a aquellas personas cercanas que siempre me han alentado y apoyado en cada paso de esta investigación. Su respaldo incondicional han sido pilares fundamentales que me han impulsado a seguir adelante y a alcanzar mis metas y aspiraciones.

A todos ellos, mi más sincero reconocimiento y gratitud. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

En este estudio, se evaluó la eficiencia de los algoritmos de optimización de flujo máximo Pseudoflow y Lerchs & Grossman en la generación de pit shells óptimos. Los parámetros utilizados para la optimización del pit fueron recopilados de la unidad minera Cuajone del reporte técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary". Se realizaron análisis detallados de precios del cobre, costos de minado, costos de procesamiento y recuperación metalúrgica para la optimización del pit final. Se consideraron diferentes precios del cobre para generar diversos escenarios económicos. El problema identificado al utilizar el algoritmo Lerchs & Grossman fue su menor eficiencia en términos de tiempo en la generación de pit shells en comparación con el algoritmo Pseudoflow. Esta menor eficiencia puede resultar en una limitación para explorar rápidamente múltiples escenarios económicos y encontrar soluciones óptimas, lo que podría afectar la eficiencia de la planificación minera. Los resultados mostraron que el VAN obtenido con el algoritmo Pseudoflow fue levemente mayor que el obtenido con el algoritmo Lerchs & Grossman, con valores de 8,784.582 MUS$ y 8,784.466 MUS$, respectivamente, lo que representa una diferencia de 0.116 MUS$. Además, se encontró una diferencia significativa de 39 minutos y 58 segundos en el tiempo requerido para la generación de los 41 pit shells por cada algoritmo de optimización, lo que evidencia una mayor capacidad del algoritmo Pseudoflow para explorar rápidamente múltiples escenarios económicos y encontrar soluciones óptimas. Se realizaron pruebas de hipótesis utilizando la prueba de normalidad y el test de Wilcoxon para determinar el nivel de significancia. Estas pruebas demostraron que los resultados obtenidos con el algoritmo Pseudoflow eran estadísticamente superiores a los obtenidos con Lerchs & Grossman, lo que respalda la superioridad del algoritmo Pseudoflow en términos de eficiencia en la generación de pit shells.

Palabras claves: Pseudoflow, Lerch & Grossman, pit final, valor actual neto, relación estéril-mineral.

ABSTRACT

In this study, the efficiency of the maximum flow optimization algorithms Pseudoflow and Lerchs & Grossman in generating optimal pit shells was evaluated. The parameters used for pit optimization were collected from the Cuajone mining unit from the technical report "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary". Detailed analyzes of copper prices, mining costs, processing costs and metallurgical recovery were carried out for the optimization of the final pit. Different copper prices were considered to generate various economic scenarios. The problem identified when using the Lerchs & Grossman algorithm was its lower efficiency in terms of time in generating pit shells compared to the Pseudoflow algorithm. This lower efficiency may result in a limitation to quickly explore multiple economic scenarios and find optimal solutions, which could affect the efficiency of mine planning. The results showed that the NPV obtained with the Pseudoflow algorithm was slightly higher than that obtained with the Lerchs & Grossman algorithm, with values of 8,784,582 MUS$ and 8,784,466 MUS$, respectively, which represents a difference of 0.116 MUS$. Furthermore, a significant difference of 39 minutes and 58 seconds was found in the time required for the generation of the 41 pit shells by each optimization algorithm, which shows a greater capacity of the Pseudoflow algorithm to quickly explore multiple economic scenarios and find optimal solutions. . Hypothesis tests were performed using the normality test and the Wilcoxon test to determine the level of significance. These tests demonstrated that the results obtained with the Pseudoflow algorithm were statistically superior to those obtained with Lerchs & Grossman, supporting the superiority of the Pseudoflow algorithm in terms of efficiency in generating pit shells.

Keywords: Pseudoflow, Lerch & Grossman, final pit, net present value, waste-to-ore ratio.

ÍNDICE

RESUMEN IV
ABSTRACT V
INTRODUCCIÓN 1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 2
1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 2
1.1.1. Interrogante general 3
1.1.2. Interrogantes específicas 3
1.2. OBJETIVOS 4
1.2.1. Objetivo general 4
1.2.2. Objetivos específicos 4
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 4
1.4. HIPÓTESIS 6
1.4.1. Hipótesis general 6
1.4.2. Hipótesis especificas 6
1.5. VARIABLES 7
1.5.1. Variable independiente 7
1.5.2. Variable dependiente 7
II. MARCO TEÓRICO 9
2.1. ANTECEDENTES 9
2.1.1. Antecedentes internacionales 9
2.1.2. Antecedentes nacionales 12
2.2. BASES TEÓRICAS 15
2.2.1. Ubicación del proyecto 15
2.2.2. Génesis del yacimiento 15
2.2.3. Minería a tajo abierto 18
2.2.4. Características de optimización de pit en la minería a tajo abierto 27

2.2.5. Tipos de algoritmo de diseño de minas a cielo abierto 29
2.2.6. Evaluación económica y selección del pit final 43
2.2.7. El Diseño Del Pit By Pit Graph 44
2.2.8. Indicadores económicos de un proyecto 46
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 47
2.3.1. Pit final 47
2.3.2. Yacimiento 47
2.3.3. Modelo de bloques 48
2.3.4. Zonas geotécnicas 48
2.3.5. Evaluación económica 48
2.3.6. Ley de corte 48
2.3.7. Costo 48
2.3.8. Revenue Factor 49
2.3.9. Stripping ratio 49
2.3.10. Extracción minera 49
2.3.11. Chancado y molienda 49
2.3.12. Flotación 49
2.3.13. Fundición 50
2.3.14. Refinación 50
2.3.15. Bast case 50
2.3.16. Worst case 50
2.3.17. Mineplan project evaluator 51
III. METODOLOGÍA 52
3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 52
3.1.1. Tipo de investigación 52
3.1.2. Nivel de investigación 52
3.2. ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL 53

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA 54
3.3.1. Población 54
3.3.2. Muestra 54
3.4. INSTRUMENTOS 54
3.4.1. Técnica de recolección de datos 54
3.4.2. Instrumentos para el procesamiento de datos 54
3.5. PROCEDIMIENTOS 55
3.5.1. Etapa preliminar 55
3.5.2. Etapa de gabinete 55
3.5.3. Confiabilidad 56
3.6. ANÁLISIS DE DATOS 57
IV. RESULTADOS Y DISCUSION 58
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS 58
4.1.1. Interpretación del modelo de bloques 58
4.1.2. Parámetros técnico-económicos 60
4.1.3. Resultado de pits shells 67
4.1.4. Eficiencia de los algoritmos de optimización. 70
4.1.5. Determinación del pit final óptimo de la mina a tajo abierto. 74
4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS 76
4.2.1. Prueba de hipótesis 77
V. CONCLUSIONES 83
VI. RECOMENDACIONES 84
VII. REFERENCIAS 85
VIII. ANEXOS 91

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables 8
Tabla 2 Valorización de bloques.....21
Tabla 3 Ubicación en coordenadas UTM WGS84.....53
Tabla 4 Características del modelo de bloques 59
Tabla 5 Zonas de mineralización del modelo de bloques 59
Tabla 6 Zonas de mineralización del modelo de bloques 60
Tabla 7 Parámetros técnico-económicos.....61
Tabla 8 Registro del precio de cobre por año (US$/lb) 62
Tabla 9 Parámetro geomecánico 66
Tabla 10 Resultados de optimización utilizando flujo máximo Pseudoflow. 67
Tabla 11 Resultados de optimización utilizando Lerch & Grossman. 68
Tabla 12 Eficiencia de optimización.....70
Tabla 13 Diferencia porcentual.....71
Tabla 14 Tiempo de optimización por algoritmo de optimización 71
Tabla 15 Prueba de normalidad.....79
Tabla 16 Rango de Wilcoxon.....80
Tabla 17 Nivel de significancia.....80

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1 Cotización del precio del Cobre – LME 5
Figura 2 Principales sistemas porfiríticos del sur de Perú 17
Figura 3 Pórfido Cuprífero.....18
Figura 4 Representación del modelo de bloque 20
Figura 5 Riesgos y ventajas en la estimación del precio y leyes de corte.....23
Figura 6 Diagrama de flujo de una operación minera a tajo abierto.....24
Figura 7 Diagrama de flujo del proceso del beneficio económico 25
Figura 8 Parámetros geomecánicos de diseño de mina a tajo abierto.....26
Figura 9 Etapas consecutivas en el proceso de planificación minera 28
Figura 10 Cierre de un Grafo 30
Figura 11 Grafo Ficticio y Arcos 31
Figura 12 Ejemplo de dependencia de bloques en la optimización del tajo 33
Figura 13 Representación gráfica del problema de optimización de tajos 34
Figura 14 Cierre máximo de un grafo.....35
Figura 15 Grafo de flujo convertido de la Figura 13 38
Figura 16 Encontrar tajos óptimos en el grafo de flujo máximo 39
Figura 17 Pits anidados y ultimate pit.....41
Figura 18 Vista en sección de 3 pit shells.....42
Figura 19 Secuencias de extracción best case y worst case.....43
Figura 20 Relación estéril-mineral y valor presente neto 44
Figura 21 Pit by Pit Graph 45
Figura 22 Ubicación de la unidad minera Cuajone.....53
Figura 23 Diagrama de flujo de optimización de pit 56
Figura 24 Dimensión del modelo de bloques.....58
Figura 25 Zonas de mineralización.....60
Figura 26 Histograma del precio de cobre por año (US$/lb).....63
Figura 27 Comparación del tiempo de optimización por algoritmo 73
Figura 28 Sección de Pit shells generados. 74
Figura 29 Gráfico Pit by Pit.....75
Figura 30 Gráfico REM vs VAN.....76

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Valor económico del bloque (US$).....20
Ecuación 2 Valor Actual Neto (US$).....46

LISTA DE ABREVIATURAS

DPC	: Depósito de pórfido de cobre.
EW	: Electro obtención.
GTZN	: Código de Zona Geotécnica.
JORC	: Joint Ore Reserves Committee Code.
LOM	: Life of Mine.
MU$	: Millones de dólares americanos
Mt	: Millones de toneladas métricas
N°	: Número.
OSA	: Overall Slope Angle.
REM	: Relación estéril-mineral
SX	: Extracción por solventes.
TIR	: Tasa interna de retorno.
t	: Toneladas métricas
UTM	: Universal Transverse Mercator.
US$	: Dólares americanos.
US$/t	: Dólares por tonelada.
US$/lb	: Dólares por libra.
VAN	: Valor actual neto.

INTRODUCCIÓN

La minería, una actividad económica e industrial especializada en la extracción de minerales del suelo y subsuelo, tiene sus raíces en la antigüedad y desempeña un papel crucial en la civilización actual al abastecer elementos esenciales para diversos sectores industriales. Esta práctica exhibe características distintivas, marcada por una duración finita y definida. En sus primeras etapas, la minería demanda inversiones e infraestructuras intensivas, estableciendo las bases críticas para su desarrollo. A pesar de los riesgos considerables, como la recuperación de capital en los primeros periodos y la volatilidad de los precios, la minería equilibra estas complejidades con beneficios y rendimientos económicos, incluyendo ganancias y utilidades. En este contexto, la actividad minera emerge como una pieza clave en el tejido económico e industrial, contribuyendo de manera significativa al desarrollo sostenible y al progreso económico.

Transformar un depósito mineral en una mina es una tarea que implica diversas etapas, requiriendo capital, tiempo, precisión y un equipo calificado. Estas etapas comprenden la prospección, exploración, evaluación del proyecto, desarrollo y construcción, producción y explotación, y finalmente, el cierre de la mina. La planificación minera se convierte en la actividad crucial que determina cuándo y cómo se extraerán los recursos económicos del yacimiento, teniendo en cuenta la eficiencia de optimización de pit para maximizar el rendimiento económico y minimizar los impactos ambientales y sociales. Este proceso vincula los objetivos estratégicos de la compañía minera con sus recursos. La generación de un plan minero, que especifica los volúmenes y las leyes de los recursos a extraer, procesar y comercializar a lo largo de la vida útil de la mina, se traduce en la cuantificación del potencial económico del yacimiento en el tiempo. En caso de que el proyecto se ejecute, se desarrollarán planes a corto plazo basados en el plan estratégico para controlar con mayor precisión los recursos. El plan estratégico debe actualizarse constantemente debido a la variabilidad de las variables originales. Sin embargo, muchas decisiones pasadas son irrevocables, por lo que es crucial una planificación sólida desde el inicio de las operaciones. Los algoritmos de optimización de pit, como Pseudoflow y Lerchs & Grossman, son fundamentales para permitir una planificación minera más eficiente y precisa.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La planificación minera emerge como una fase crítica en el proceso operativo de una mina, donde se lleva a cabo una evaluación meticulosa de los recursos minerales con el objetivo primordial de maximizar los rendimientos económicos. Este proceso implica la identificación y análisis detallado de las variables clave para la extracción del mineral, lo que conlleva a la elaboración de planes mineros precisos que especifican con exactitud los métodos, tiempos y ubicaciones óptimas para la extracción del recurso. Históricamente, el empleo de algoritmos generales y técnicas de programación lineal ha sido común en el modelado de la producción minera, particularmente en operaciones a cielo abierto. No obstante, la adopción generalizada de estas herramientas se ha visto obstaculizada por limitaciones no parametrizadas que resultan en desviaciones respecto a los planes mineros previstos y en demoras durante los procesos de optimización.

En este contexto, los métodos basados en el concepto de flujo máximo Pseudoflow emergen como una opción altamente efectiva para determinar la capacidad óptima de extracción de material en un pit minero en un periodo dado. Estos métodos ofrecen ventajas significativas en tiempo y eficiencia en comparación con métodos tradicionales como Lerchs & Grossman.

Una desventaja significativa del método Lerchs & Grossman para optimizar pits es su limitación para manejar de manera eficiente la complejidad y las restricciones geológicas y económicas en operaciones mineras modernas. Este método tiende a generar diseños de pit que pueden ser subóptimos en términos de rentabilidad y eficiencia, especialmente en situaciones donde existen múltiples variables y restricciones que deben tenerse en cuenta. Además, el método Lerchs & Grossman puede requerir un tiempo considerable para generar soluciones, lo que puede resultar en retrasos en la toma de decisiones críticas en la planificación minera. Comparado con métodos más avanzados como el flujo máximo Pseudoflow, Lerchs & Grossman puede ofrecer resultados menos precisos y eficientes en la optimización de pits.

Una de las herramientas clave que se ha utilizado es la herramienta Project Evaluator del software Mineplan, el cual proporciona una interfaz más intuitiva y con mayor rendimiento. Esto facilita la construcción de modelos de red que representan la estructura de la mina y los flujos de material, lo que a su vez permite una optimización más precisa y rápida. El método de flujo máximo Pseudoflow se distingue por su capacidad para encontrar soluciones óptimas en un tiempo razonable, incluso en minas con una gran cantidad de restricciones y complejidades. Además, su enfoque basado en modelos de red ofrece una representación más fiel de la realidad de la mina, lo que resulta en una mayor precisión en los resultados de la optimización. El enfoque propuesto se centra en la aplicación del método de flujo máximo Pseudoflow para determinar la configuración óptima del pit final en operaciones de minería a cielo abierto, como la unidad minera Cuajone. Para ello, se empleará el software especializado HxGN MinePlan 15.8, con el objetivo de generar soluciones más eficientes que impulsen el crecimiento del valor económico de las empresas mineras mediante una planificación más sofisticada y efectiva.

1.1.1. Interrogante general

¿Permitirá la propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow determinar el límite del pit final de forma más eficiente que el algoritmo Lerch & Grossman?

1.1.2. Interrogantes específicas

1. ¿Cuáles son los parámetros necesarios para delimitar el pit final?
2. ¿El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor que el algoritmo Lerch & Grossman?
3. ¿El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Evaluar si la propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permite determinar el límite del pit final de forma más eficiente que el algoritmo Lerch & Grossman.

1.2.2. Objetivos específicos

1. Identificar los parámetros necesarios para delimitar el pit final.

2. Determinar si el tiempo de optimización del pit final utilizando el algoritmo Pseudoflow es menor que utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.

3. Determinar si el VAN obtenido del pit final utilizando el algoritmo Pseudoflow es mayor que el VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

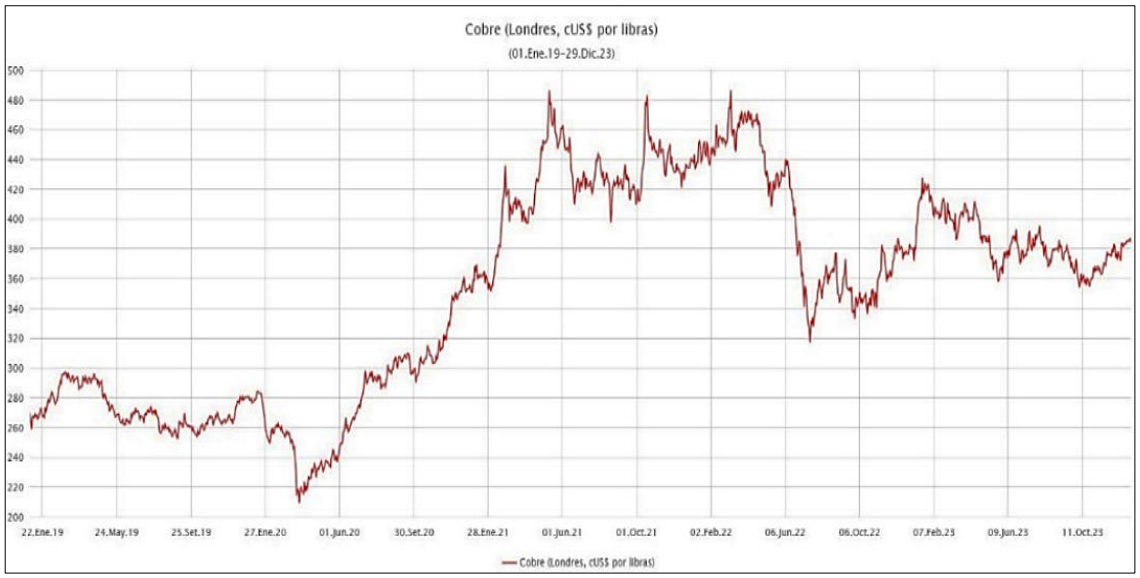
Este proyecto de tesis se presenta en el contexto de la industria minera, donde la delimitación del pit final es un aspecto crítico en la planificación y operación de minas a tajo abierto. La elección de la configuración óptima del pit final tiene un impacto significativo en la rentabilidad y la viabilidad económica a largo plazo de un proyecto minero. Por lo tanto, la aplicación de métodos avanzados de optimización, como el método de flujo máximo Pseudoflow, adquiere una importancia fundamental a la hora de generar múltiples escenarios de optimización. El método de flujo máximo Pseudoflow se justifica por su capacidad para relajar las restricciones de equilibrio de flujo, lo que permite una delimitación más flexible del pit final. A diferencia de otros algoritmos de optimización, el Pseudoflow no requiere que los nodos cumplan estrictamente con las restricciones de equilibrio de flujo, lo que lo hace más versátil y efectivo en la delimitación del pit final en minas a tajo abierto. Además, ha demostrado ser eficiente en la optimización de modelos de bloques grandes, ofreciendo velocidades de cálculo superiores y un rendimiento óptimo.

La variabilidad en los precios de los metales es otro aspecto crucial que influye en la planificación minera y, por ende, en la selección del pit final. Los precios de los metales son inherentemente volátiles y están sujetos a fluctuaciones en función de factores como la oferta y la demanda, así como los ciclos económicos globales. Por lo tanto, es esencial evaluar cómo estas fluctuaciones afectan la rentabilidad del proyecto y tomar decisiones informadas sobre la delimitación del pit final en función de diferentes escenarios económicos, desde optimistas hasta adversos.

La Figura 1, que muestra la relación entre el precio del cobre, la oferta y demanda del metal, proporciona un contexto valioso para comprender la influencia de los precios de los metales en la planificación minera. Este análisis resalta la importancia de considerar los factores económicos y la dinámica del mercado al tomar decisiones relacionadas con la extracción y comercialización de minerales.

Figura 1

Cotización del precio del Cobre – LME



Nota. Datos expresados en cUS$/lb. Adaptado de Banco Central de Reserva del Perú, 2023 (https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas).

En el contexto de la LME, un mercado dinámico donde se negocian los metales industriales más importantes del mundo, como el cobre, se evidencia la influencia de diversas fuerzas en la determinación de los precios de este metal.

Las políticas gubernamentales y las regulaciones desempeñan un papel crucial al influir en la producción y el comercio del cobre. Asimismo, los cambios en los tipos de cambio entre las monedas pueden tener un impacto significativo en los precios del cobre, dado su comercio internacional. Otro factor de importancia son los niveles de inventario de cobre, ya que los aumentos pueden indicar una sobreoferta o una disminución en la demanda, ejerciendo presión sobre los precios, mientras que una disminución en los inventarios puede sugerir una mayor demanda o una menor oferta, lo que podría impulsar aún más los precios.

Este proyecto de tesis se justifica por su enfoque integral que combina análisis técnico-económicos y métodos avanzados de optimización para determinar la configuración óptima del pit final. La importancia de esta investigación radica en su contribución al desarrollo de prácticas de planificación minera más eficientes y rentables, que garantizan la sostenibilidad financiera a largo plazo de los proyectos mineros.

1.4. HIPÓTESIS

1.4.1. Hipótesis general

La propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permitirá determinar el límite del pit final de forma más eficiente ante el algoritmo Lerch & Grossman.

1.4.2. Hipótesis especificas

1. El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor que el algoritmo Lerch & Grossman.

2. El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.

1.5. VARIABLES

1.5.1. Variable independiente

Algoritmos de optimización de pit shells, para el presente caso de estudio se empleará el algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman.

Indicador:

- Precio del metal: El valor del metal en el mercado, que puede fluctuar y afectar significativamente la rentabilidad del proyecto.

1.5.2. Variable dependiente

Eficiencia de optimización pit shells.

Indicadores:

- Tiempo de optimización de pit shells.
- Valor actual neto.

A continuación, se presenta un resumen detallado de las variables, sus tipos, dimensiones, indicadores y las herramientas que se utilizarán en el proyecto de investigación, como se muestra en la Tabla 1, que corresponde a la operacionalización de variables.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Tipo de variables	Definición Conceptual	Indicadores	Dimensiones	Herramientas
Variable independiente	Algoritmos de optimización y el precio del cobre variable, ajustable para evaluar diferentes escenarios económicos y su impacto en la rentabilidad del proyecto minero.	• Precio del cobre.	US$/lb	• HxGN MinePlan 15.8 - Project Evaluator.
Variable dependiente	Eficiencia de optimización de pit evaluada a través de indicadores como el valor actual neto y tiempo de optimización.	• Valor actual neto. • Tiempo de optimización	MUS$ s	• Registro de tiempos de optimización. • IBM SPSS Statistics.

Nota. Elaboración propia.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. Antecedentes internacionales

Musenge & Chanda (2022) en su investigación "Ultimate Pit Limits using Maximum Flow Algorithm Ford and Fulkerson: The Case of Study of North Mutoshi Project, DRC." esta investigación analiza el uso del algoritmo de Ford y Fulkerson para determinar el límite final del tajo en la minería a cielo abierto. El algoritmo se implementa en Python y se compara con el algoritmo de Lerchs-Grossman. Los resultados muestran que el algoritmo de Ford y Fulkerson proporciona un diseño de tajo óptimo en un tiempo más corto en comparación con el algoritmo de Lerchs-Grossman. El estudio valida la efectividad del algoritmo de Ford y Fulkerson y proporciona un marco para su aplicación en la industria minera.

Avalos & Ortiz (2020) en su investigación "A guide for pit optimization with Pseudoflow in python." nos indica la importancia del uso del método de flujo máximo Pseudoflow en la minería a cielo abierto al determinar la máxima cantidad de material extraíble para maximizar el valor neto de los bloques. Se centra en representar el problema mediante grafos dirigidos y describe su implementación práctica en Python. Se incluye un ejemplo de aplicación a un depósito de cobre con códigos específicos para representar la red de bloques y sus relaciones económicas y geométricas. Esta guía ofrece una herramienta valiosa para profesionales en el diseño y planificación de operaciones a cielo abierto.

En el artículo Mbolela et al., (2019) titulado "Optimization of Open Pit Mining under Surpac and Whittle - Application to the Ruashi II and III Deposits." se centra en la optimización de operaciones mineras a cielo abierto utilizando los softwares Surpac y Whittle, con un enfoque específico en los yacimientos Ruashi II y III. Se implementaron técnicas avanzadas para mejorar la planificación del pit y su diseño, con el objetivo de maximizar la eficiencia del proceso minero. Los resultados obtenidos revelan mejoras sustanciales en la rentabilidad, destacando un enfoque más

efectivo en la extracción de minerales. La aplicación exitosa de estas herramientas proporciona valiosas perspectivas para la gestión eficiente de operaciones mineras a cielo abierto, mostrando un potencial significativo para aumentar la productividad y la rentabilidad en proyectos similares.

Kapageridis (2018) en el artículo titulado “Application of the Push-Relabel Algorithm to Lignite Surface Mine Optimisation.” nos indica que el método Pseudoflow es una técnica de optimización de minas a cielo abierto que se utiliza para resolver el problema de la máxima clausura de flujo de red, que es una representación del problema de optimización de la mina. Este método es una alternativa a los algoritmos tradicionales como el de Lerchs-Grossman y ha demostrado ser eficaz en la resolución de problemas de flujo máximo, que son fundamentales en la optimización de minas a cielo abierto. El método Pseudoflow se basa en la idea de preflujos y etiquetado de distancias, y ha sido implementado en software de planificación minera como el módulo de optimización de minas de Maptek Vulcan, que también incluye implementaciones de los algoritmos de Lerchs-Grossman y Push-Relabel.

Poniewierski (2018) Desarrollo el articulo “Pseudoflow explained a discussion of deswik Pseudoflow pit optimization in comparison to whittle lg pit optimization.” La investigación compara dos algoritmos de optimización de tajos en minería: el algoritmo de Pseudoflow de Deswik y el algoritmo de Lerchs & Grossman de Whittle. Se destaca la eficiencia del algoritmo de Pseudoflow, que produce resultados idénticos al algoritmo Lerchs & Grossman, pero a una velocidad superior. Ambos algoritmos presentan limitaciones debido a posibles errores en los parámetros de entrada y se resalta la importancia de estimaciones precisas para obtener resultados confiables. La implementación de Deswik del algoritmo de Pseudoflow brinda mayor control sobre los cálculos, pero se advierte a los usuarios sobre posibles errores e incertidumbres en el proceso.

Xiaoyu et al. (2017) desarrolló el articulo “Pseudoflow method for pit optimization.” nos indica que el algoritmo de Pseudoflow implementado en GEOVIA Whittle ofrece una optimización de pozos más rápida que el

algoritmo tradicional de Lerchs & Grossmann. Según los datos del estudio, el algoritmo de Pseudoflow es capaz de resolver problemas con hasta 509 millones de arcos activos de manera eficiente en una computadora con 32 GB de RAM, y aún puede manejar problemas de hasta 550 millones de arcos activos utilizando memoria virtual. Además, el algoritmo de Pseudoflow en GEOVIA Whittle ha demostrado ser más rápido que el método Lerchs & Grossmann, especialmente para modelos de bloques más grandes. Estas mejoras en velocidad abren la posibilidad de resolver problemas que antes eran demasiado grandes para el motor tradicional de Lerchs & Grossmann. La implementación del algoritmo de Pseudoflow en GEOVIA Whittle no solo acelera el proceso de optimización de pozos, sino que también ofrece resultados similares al método Lerchs & Grossmann, lo que lo convierte en una opción preferida para la planificación minera estratégica.

Hochbaum (2008) en el artículo titulado "The Pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum flow problem." se presenta el algoritmo de Pseudoflow para resolver el problema de flujo máximo en redes. Destacan su posición intermedia entre los algoritmos simples y push-relabel, explorando variantes y aplicaciones en análisis paramétrico y de sensibilidad. El proceso implica la inicialización de un árbol normalizado, con mejoras de tiempo polinómico. Además de abordar el flujo máximo, se utiliza para el problema del corte bloqueante y la generalización del cierre máximo. El artículo compara eficiencia con otros algoritmos y concluye con discusiones sobre invariantes, complejidad y estructuras de datos utilizados.

Muir (2004) desarrolla el artículo “Pseudoflow, New Life for Lerchs-Grossmann Pit Optimisation” que tiene como objetivo explorar variantes del algoritmo Lerchs & Grossmann para el diseño de minas a cielo abierto, comparando su eficiencia con métodos de Pseudoflow. Se encuentra que los métodos de Pseudoflow son más eficientes para modelos grandes, ofreciendo ahorros de tiempo significativos y posibilitando la generación rápida de pits de etapas intermedias. Las variantes de Pseudoflow no alteran el proceso fundamental del algoritmo Lerchs & Grossman, pero especifican la forma de procesar enlaces débiles-sobre-fuertes. Se utilizan técnicas de pre-paso para optimizar el rendimiento en la generación de pits. Además, se

sugieren aplicaciones potenciales en problemas de flujo de red más generales y en la generación de árboles fundamentales para la programación de la producción. En general, los métodos de Pseudoflow presentan ventajas notables en términos de eficiencia y versatilidad en comparación con el algoritmo Lerchs & Grossman tradicional.

Down (1994) en el la investigación titulada “Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning.” se enfoca en la evaluación de riesgos en la estimación de reservas y la planificación de minas a cielo abierto en la industria minera. Destaca la importancia de considerar la incertidumbre y el riesgo en estas actividades. Dowd, basándose en su experiencia y la literatura existente, ofrece una visión detallada de las metodologías y prácticas en la evaluación de riesgos en el contexto minero. El objetivo principal es analizar y mejorar los métodos de evaluación de riesgos para optimizar la planificación y operación de minas, brindando una comprensión más profunda de cómo la incertidumbre y el riesgo impactan las decisiones en la industria minera y cómo gestionarlos de manera efectiva.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Mendoza (2021) en la tesis “Optimización del valor presente neto aplicando secuenciamiento de fases direccionadas en el diseño del pit del proyecto Cotabambas – Panoro Minerals.” desarrolla la optimización del valor presente neto en la planificación del proyecto Cotabambas de Panoro Minerals mediante secuenciamiento de fases direccionadas. Al comparar dos planes mineros con estrategias diferentes, se observa un aumento del 18% en rentabilidad y un 42% en reservas de mineral al implementar dirección de minado y ley de corte variable. Se sugiere la adopción de tecnologías autónomas para mejorar productividad y reducir costos, destacando beneficios económicos y medioambientales. El estudio incluye un modelo económico y técnico con indicadores clave. Se utiliza análisis de datos, software minero, y algoritmos de optimización como el método del cono flotante y Lerchs & Grossman. El yacimiento se caracteriza por mineralización en zonas de enriquecimiento. Se destaca la importancia del

límite final óptimo de la mina y la ley de corte, utilizando el algoritmo de Lane para la optimización de la operación minera.

Ludeña (2020) en la tesis "Modelamiento, cálculo de reservas y diseño de pit final mediante perforación diamantina en depósitos porfiríticos, distrito Cashapampa - Ancash 2020" aborda el desarrollo de un plan minero para un depósito porfirítico en Cashapampa, Ancash. Se emplea el método de Lerchs & Grossman y el código JORC para calcular reservas, utilizando MineSight y técnicas de optimización. La investigación incluye la planificación y ejecución de perforación diamantina, generación de modelos geológicos, cálculo de recursos y reservas, y diseño del Pit Final con consideraciones éticas y geográficas. Se señalan limitaciones debido a la pandemia y falta de acceso al área, proponiendo investigaciones adicionales con diferentes herramientas para una mayor precisión y comprensión del diseño de minas a tajo abierto.

La tesis de Colquehuanca (2016) titulada “Planeamiento de minado a largo plazo haciendo uso del software Whittle 4.4 CIA Minera Aurífera Santa Rosa Comarsa S.A.”, describe el proceso de determinación del pit final y la generación de un plan de minería. El proceso de optimización basándose en el algoritmo de Lerch & Grossmann y evalúa la oportunidad de extraer bloques a diferentes precios. El pit final seleccionado es el número 25, que cumple con los criterios para una extracción y operación óptima. El plan de minería incluye tres fases con movimientos de material similares para asegurar un suministro constante a la planta. Finalmente menciona la importancia de utilizar el software de minería Whittle 4.4 para las tareas de planificación minera. Además, se recomienda continuar con la exploración para aumentar las reservas y optimizar los procesos para reducir los costos e incrementar las reservas.

Centeno (2014) de la tesis titulada “Optimización en la estimación de recursos y límite de explotación en el proyecto Michiquillay” donde se aplicó el algoritmo de Lerch & Grossman, se consideraron diversas variables, entre ellas el modelo de bloques con dimensiones de 25x25x15 metros, los costos asociados a la mina y la planta, así como parámetros

geotécnicos relevantes. La determinación del pit final se basó en el empleo de una tasa de descuento del 10%, ubicándolo específicamente en el pit 85. La optimización de la explotación se llevó a cabo en seis fases distintas. Se logró un valor actual neto para la mina de 12 490 MUSD, consolidando así los resultados económicos positivos del proyecto.

Mendoza (2014) de la tesis titulada "Optimización de alternativas de pit final del tajo pukaqaqa grupo milpo - Huancavelica - Perú" tiene como objetivo centrarse en la optimización y diseño de un tajo abierto para la extracción de cobre y molibdeno. Se utiliza el software MineSight y el método de Lerchs & Grossmann para el diseño del pit óptimo, considerando parámetros económicos. La comparación entre las reservas del pit final y el pit de diseño muestra una ligera disminución en las reservas y ley de cobre debido a las rampas de acceso, pero sin cambios significativos en el margen de variación.

Yucra (2013) en la Universidad de Micaela Bastidas de Apurímac, facultad de ingeniería, desarrolla la investigación denominada "Optimización y planificación para la explotación del tajo Minas Pampa." el trabajo aborda la planificación a largo plazo de la mina de oro Minas Pampa en sus inicios de operación, buscando maximizar el valor económico mediante el uso del algoritmo de Lerchs & Grossman para determinar el tamaño óptimo del tajo. Se presentan antecedentes, parámetros clave y avances en la optimización del tajo. El análisis del caso de minas pampa incluye la evaluación del pit final económico frente a cambios en variables clave. Se establece un plan minero con fases de minado y se aplica el algoritmo de Milawa para obtener un programa de producción a largo plazo. El enfoque se centra en comparar volúmenes de minerales, estéril movido y valor presente neto. Se realiza un análisis de sensibilidad y riesgo para implementar medidas de control y reducir los riesgos del proyecto.

Brañes (2010) del artículo titulado "Rentabilidad mínima en la optimización del límite final de minado." la investigación aborda la relevancia de la rentabilidad mínima en la optimización del límite final de minado, un aspecto crucial en la planificación estratégica de la industria

minera. Se centra en cómo la planificación estratégica del minado, la optimización del límite final, las fases de minado y el análisis de riesgo contribuyen a asegurar la rentabilidad mínima necesaria para la viabilidad del proyecto. Se sugiere un método de análisis incremental para determinar la rentabilidad incremental y se ilustra con un caso práctico la selección del límite final basándose en criterios de rentabilidad. Además, se incluye una tabla que relaciona datos de rentabilidad con las fases de minado y se ofrecen conclusiones sobre cómo la optimización de estas fases puede reducir los riesgos financieros durante los últimos años de operación de una mina.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Ubicación del proyecto

El área de estudio corresponde a la unidad minera Cuajone tipo pórfido de cobre y molibdeno, situada en el distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, en el departamento de Moquegua. La ubicación precisa se encuentra dentro de los cuadrángulos 34U y 35 U Moquegua en la zona UTM 19, con coordenada central de 318,000E y 814,842N. Desde una perspectiva geográfica, está posicionada a 17°02´S y 70°42W, con una elevación que oscila entre 2950 y 3880 metros sobre el nivel del mar (Espinoza & Vera, 2018).

2.2.2. Génesis del yacimiento

El avance de la placa continental sudamericana sobre la placa subductora del pacifico oriental es la responsable de la formación de varios yacimientos ubicados al norte de chile y al sur de Perú, todas estas tienen las mismas características que son de pórfido de cobre; la placa subductora del pacifico generó una gran energía mediante rozamiento, permitiendo la fusión de las rocas con un gran contenido de cobre, posterior a ello la gran cantidad de energía permitió aperturas por las zonas de debilidad, por donde el magma, gases a grandes presiones y alta temperatura empezaron a circular, generando por alteración hidrotermal zonas apropiadas para que se depositen las soluciones mineralizantes (Concha, 1999).

2.2.2.1. Genesis Cuajone

El yacimiento se sitúa en la subprovincia cuprífera del Pacífico, en el flanco occidental de los Andes, alineándose con depósitos destacados como Toquepala, Cerro Verde y Quellaveco. Las rocas más antiguas en Cuajone, del Grupo Toquepala, datan de hace entre 100 y 34 millones de años. La andesita basáltica, que constituye el basamento, posiblemente sea un intrusivo somero del Batolito Andino del Sur, correlacionado con la diorita en Toquepala. Posteriormente, entre hace 70 y 100 millones de años, se depositaron la andesita basáltica y el volcánico Quellaveco, ambos del Grupo Toquepala. Entre hace 60 y 65 millones de años, ocurrió la intrusión del cuerpo diorítico-granodiorítico hacia el norte, y entre hace 50 y 60 millones de años, la intrusión de la latita porfirítica en tres eventos o pulsos magmáticos. Estos eventos generaron las condiciones para la mineralización del yacimiento. A partir de hace unos 24 a 50 millones de años, la erosión afectó al Grupo Toquepala y al volcánico Quellaveco, seguida de un proceso de lixiviación y enriquecimiento del yacimiento durante millones de años. Entre hace 17 y 23 millones de años, se reanudó la actividad magmática con la formación de rocas de la formación Huaylillas, seguido de procesos erosivos que formaron paleo valles. Entre hace 14 y 17 millones de años, surgieron la quebrada Chuntacala y Torata, seguida nuevamente por un proceso de lixiviación y enriquecimiento del yacimiento en menores magnitudes. Entre hace 9 y 14 millones de años, se dio otro periodo de actividad magmática, seguido de periodos erosivos intraformacionales y la deposición de los volcánicos de la formación Chuntacala. Finalmente, en los últimos 9 millones de años, se presentó un cuarto periodo erosivo, dando forma a la topografía actual del yacimiento antes de su extracción (Concha, 1999).

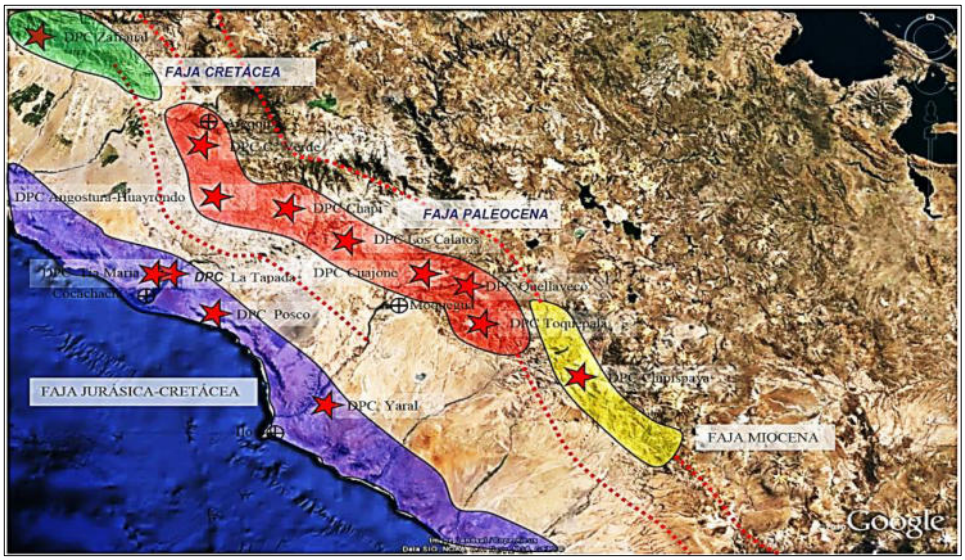
2.2.2.2. Geología de yacimientos porfiríticos en el Perú

La región que se extiende desde Ica hasta Tacna en el sur de Perú alberga sistemas de pórfidos de cobre-molibdeno de edad cretácea superior. Estos depósitos, como Los Pinos, Puquio, Pucacorral, Lara, Pecoy Ocaña, Zafranal, La llave, Angostura, y el proyecto Chipispaya, forman una extensión de la faja de pórfidos por más de 700 km. (Martínez et al., 2017).

Los depósitos porfiríticos se encuentran entre 3000 y 4000 msnm, principalmente entre 16°S y 18°S. La estructura geológica se define por el metalotecto "Sistema de Fallas Incapuquio, Cincha-Lluta. Alto potencial para yacimientos tipo DPC entre Chapi y Los Calatos, Los Calatos hacia Cuajone, y de Toquepala a Chipispaya, con la posibilidad de exploración en la quebrada Huaracane (Martínez et al., 2017).

Figura 2

Principales sistemas porfiríticos del sur de Perú



Nota. principales sistemas porfiríticos del sur de Perú. Tomado de: "*Geología y controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental Sur de Perú*" (p.57), por Martínez et al., 2017.

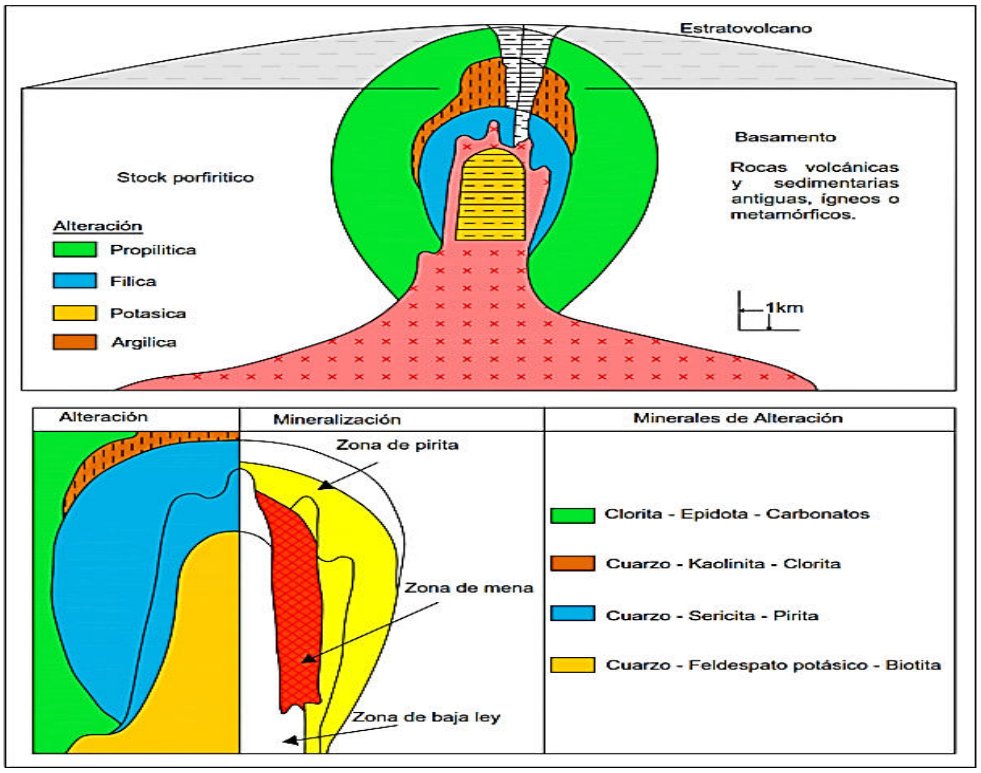
2.2.2.3. Yacimiento tipo pórfido de cobre

Los pórfidos cupríferos son esencialmente depósitos minerales de baja ley y gran tonelaje. Se denominan pórfidos porque frecuentemente, pero no exclusivamente, se asocian con rocas ígneas intrusivas con fenocristales de feldespato en una masa fundamental cristalina de grano fino. La textura porfírica indica que los magmas intruyeron y cristalizaron cerca de la superficie y debido a su naturaleza relativamente poco profunda se denominan intrusivos epizonales, pero ellos pueden ser equigranulares con grano moderadamente grueso (Maksaev, 2004).

Se presenta la configuración geométrica y cronológica de las intrusiones principales, áreas de modificación en la roca encajonante y focos de alteración hidrotermal. Este análisis revela la complejidad estructural y temporal del yacimiento, proporcionando una comprensión detallada de su evolución geológica. Esta información es crucial para decisiones estratégicas en minería, permitiendo exploraciones y extracciones más efectivas y precisas.

Figura 3

Pórfido Cuprífero



Nota. Modelo de un depósito tipo Pórfido de cobre. Tomado de *"Implementación de programa de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) para el muestreo de detritos en depósitos tipo pórfido de cobre"* (p. 36), por Rojas, 2019.

2.2.3. Minería a tajo abierto

La minería a cielo abierto es un método de extracción de minerales que se realiza en la superficie de la tierra, donde el material que se desea extraer se encuentra relativamente cerca de la superficie. En este tipo de

minería, se remueve la capa superficial del suelo para acceder al mineral deseado. Este método es comúnmente utilizado para extraer minerales como el carbón, el cobre, el oro y el hierro, entre otros.

El proceso comienza con la exploración del sitio para determinar la ubicación y la concentración de los minerales. Una vez identificado el depósito, se realiza un estudio de viabilidad para evaluar la rentabilidad del proyecto. Si el proyecto es viable, se procede a la preparación del terreno, que puede incluir la deforestación y la remoción de la capa superior del suelo.

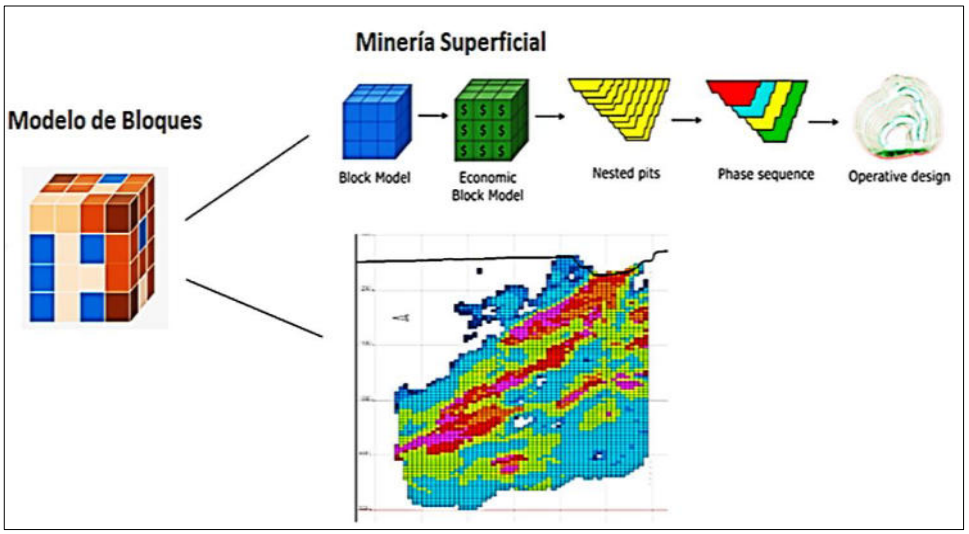
2.2.3.1. Modelo de Bloques

El modelo de bloques a largo plazo se representa como una estructura tridimensional, donde cada bloque posee una base cuadrada con una longitud específica y una altura que generalmente coincide con la altura del banco de minado. La dimensión de los bloques, que suele ser de 20 x 20 x 15, se determina utilizando datos geoestadísticos. Esta disposición permite una representación precisa del terreno y de los recursos minerales en el área de interés, facilitando así la planificación y el diseño de la operación minera. (Gonzales, 2010).

Para iniciar el modelo de bloques, se requiere la inclusión de todas las variables necesarias para su representación. Cada bloque contiene datos numéricos que abarcan diversos aspectos como topografía, leyes de mineral, características de la roca, alteración, mineralización, densidad, dureza, índice de solubilidad, entre otros. Es crucial realizar un modelado geológico preciso y mantenerlo en un sistema electrónico, ya que este constituye la base para la evaluación de reservas geológicas y económicas, así como para la planificación minera a corto, mediano y largo plazo.

Figura 4

Representación del modelo de bloque



Nota. Adaptado Micon International, 2020 (www.micon-international.com). CC BY 2.0.

2.2.3.2. Valor económico del bloque

El cálculo del valor económico de cada bloque en minería constituye un proceso esencial en la optimización de pit y en la planificación minera en general. Esta evaluación implica la consideración minuciosa de los ingresos potenciales derivados de la extracción del material, así como también de los costos asociados a esta actividad, que abarcan desde los costos de extracción hasta los de procesamiento y transporte. La fórmula empleada para este cálculo integra estos diversos aspectos y proporciona una métrica fundamental para la evaluación de la rentabilidad y la viabilidad de la operación minera. Para el cálculo de valor económico del bloque se emplea la siguiente Ecuación 1.

Valor económico del bloque (US$)

$$ValorBloque = max\{-CM, Ben_{bloque}\}.Ton_{bloque}$$
$$Ben_{bloque} = Ingresos - Costos \quad (1)$$

$$Ingresos = \sum_i (P_i - Cv_i)\,.L_i\,.\ R_i\,.f_i$$

$$Costos = CM + CP$$

Donde:

CM: costo mina

CP: costo planta

P_i: precio del elemento i

Cv_i: Costo de venta del elemento i

R_i: Recuperación metalúrgica del elemento i

L_i : ley del elemento i presente en el bloque

f_i: factor de conversión de elemento i para tener unidades de $

Según el valor del beneficio del bloque se define el destino del elemento de interés, ya sea, el elemento se irá al botadero (elemento corresponde a estéril) o irá a la planta (elemento es mineral de interés). En la Tabla 2 se muestran los distintos destinos que puede tener el bloque.

Tabla 2

Valorización de bloques

Beneficio	Elemento	Destino
B <- Cm	Estéril	Botadero
B ≥- Cm y B < 0	Mineral Margina	Stock
B ≥ 0	Mineral	Planta

Nota. Elaboración propia.

Una vez valorizados los bloques del modelo se utilizan diferentes metodologías de optimización para determinar la envolvente económica a extraer.

2.2.3.3. Parámetros económicos para optimización de pits

La valoración de cada bloque se establece considerando su valor, que se calcula a partir de la diferencia entre los ingresos generados por la venta del material contenido y los costos totales relacionados con su

procesamiento y comercialización en el mercado. El precio es el factor más significativo en términos de ingresos, mientras que los costos se determinan según atributos como la concentración del mineral, la recuperación metalúrgica según el tipo de material y el método de procesamiento utilizado (Amankwah et al., 2014).

a) Precio

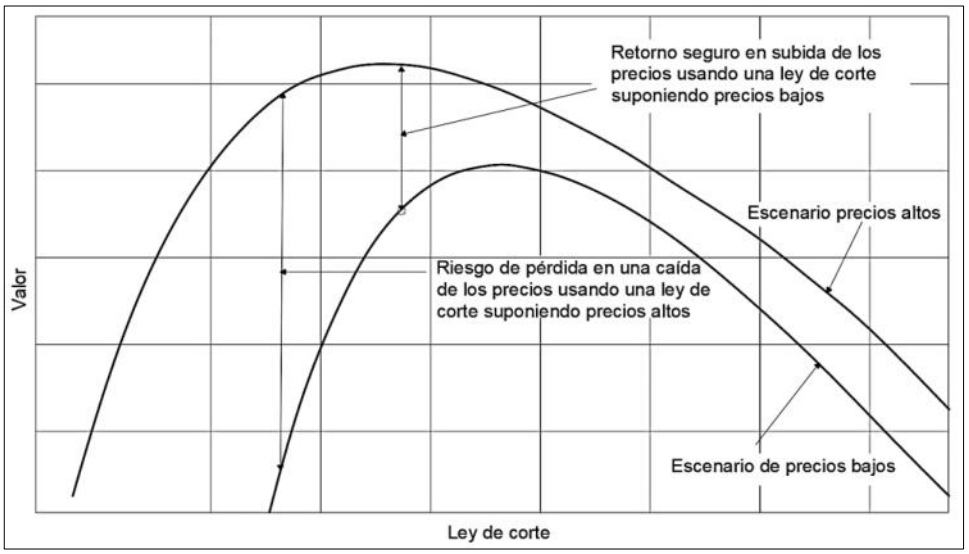
El precio del cobre es un factor crucial para la industria minera y la economía global debido a su amplia utilización en varios sectores. Su valor se ve influenciado por la oferta y la demanda mundial, los inventarios disponibles, desarrollos económicos y políticos, y expectativas del mercado. Para las empresas mineras, el precio del cobre afecta directamente sus ingresos y rentabilidad, siendo un indicador importante de la salud económica global y un factor clave para la toma de decisiones en la industria minera (Cárcamo, 2018).

La ley de corte en la minería está estrechamente ligada al precio de los metales, ya que las fluctuaciones en los precios pueden afectar significativamente la viabilidad y duración de una mina.

Henderson (2011) destaca la ventaja de utilizar un precio ligeramente inferior al precio actual para calcular la ley de corte. Esto se debe a que un precio alto aumenta el riesgo de pérdidas en caso de una caída en los precios, mientras que un precio más bajo permite resistir las caídas de precios, incluso si se obtienen ganancias menores. En la Figura 5 se destaca los riesgos y ventajas de una estimación del precio del metal de interés en relación a la ley de corte.

Figura 5

Riesgos y ventajas en la estimación del precio y leyes de corte



Nota. Tomado de *"kinross mine planning best practice"* (p.713), por Henderson, 2011.

Independientemente del método utilizado, el precio de los metales siempre se establece mediante la recopilación de datos. Estos datos permiten explorar diferentes escenarios, analizar el potencial y evaluar los riesgos asociados a cada caso.

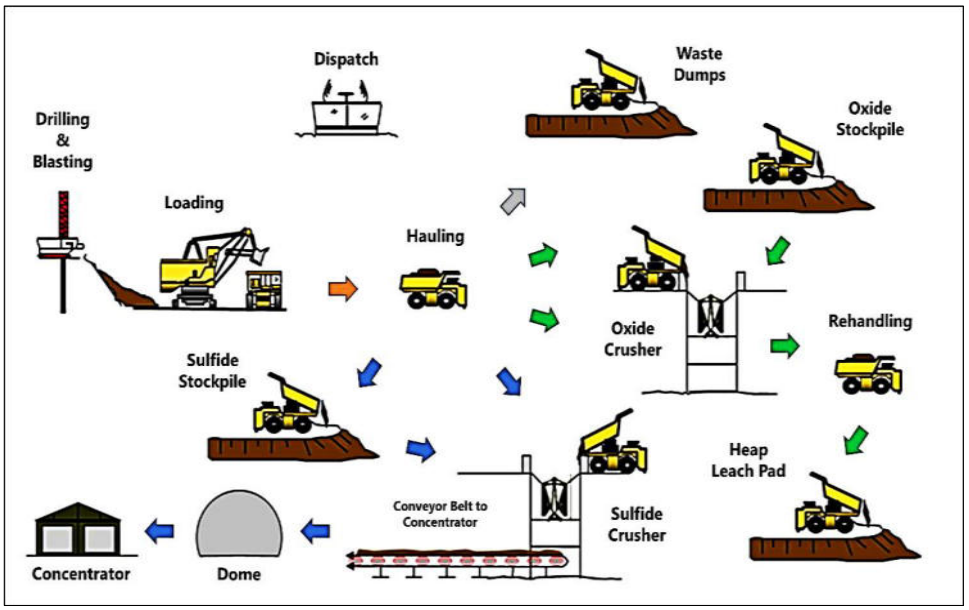
b) Costo de minado

Abarca los gastos directos e indirectos asociados con la extracción de minerales de un yacimiento. Este costo incluye una variedad de componentes relacionados con la actividad minera y es esencial para evaluar la viabilidad económica de un proyecto minero (Vidal, 2023).

En la Figura 6 podemos observar un diagrama de operaciones mineras en una mina superficial.

Figura 6

Diagrama de flujo de una operación minera a tajo abierto



Nota. Tomado de *"Cuajone Operations Peru Technical Report Summary"*, por Wood Group, 2022.

c) Costo de procesamiento

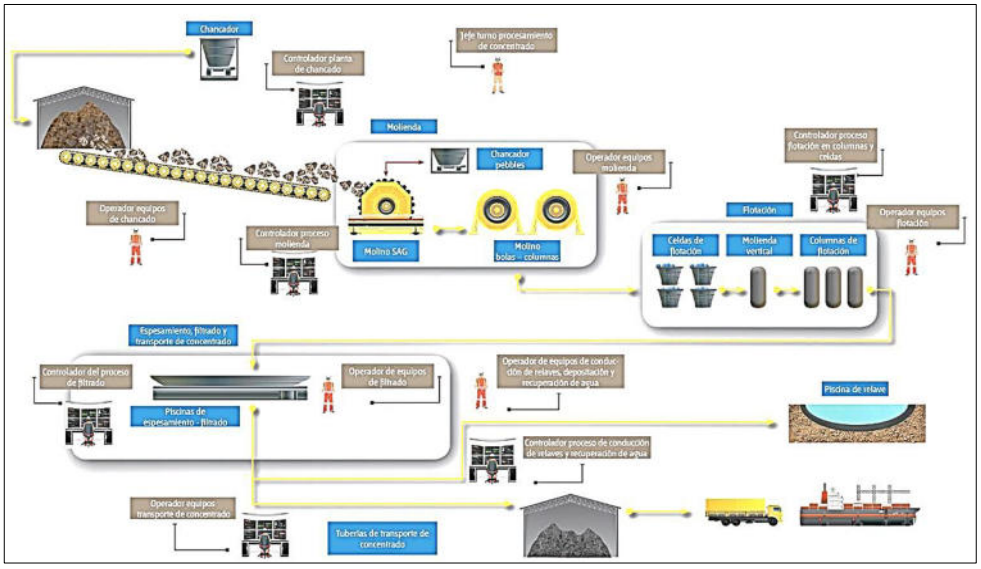
Los costos asociados con las etapas de procesamiento de minerales desde la extracción hasta la obtención del producto final. Estos costos son esenciales para evaluar la viabilidad económica de un proyecto minero y comprenden diversos aspectos relacionados con la reducción del tamaño de las rocas, la separación de minerales, y la preparación del producto para su comercialización (Gonzales, 2010).

El costo de procesamiento en la minería del cobre es una parte fundamental de la estructura de costos de una operación minera. Este costo incluye una serie de actividades y procesos necesarios para extraer y beneficiar el mineral de cobre, preparándolo para su comercialización. Algunas de las principales actividades comprendidas en el costo de procesamiento son: extracción, chancado y molienda, flotación, fundición, refinación. En la Figura 7 podemos observar el diagrama de flujo del proceso del beneficio económico.

Si los costos aumentan con la profundidad o varían en diferentes partes de la mina, es esencial incluir un costo adicional que refleje estos incrementos en los parámetros económicos. Los costos de operación pueden diferir dependiendo del tipo de mineral, la composición del material estéril, la naturaleza de la roca, o las áreas específicas dentro de la mina. Estas variaciones deben considerarse al establecer los parámetros de costos de operación de la mina.

Figura 7

Diagrama de flujo del proceso del beneficio económico



Nota. Adaptado Minas Riotinto, 2019 Micon International, 2020 (minasderiotinto.webnode.es).

d) Recuperación Metalúrgica

La recuperación de minerales se define como el proceso o tratamiento aplicado al material extraído de la mina para convertirlo en concentrado, cátodo, doré u otros productos. Este factor es fundamental en la optimización del tajo, ya que puede variar dependiendo del tipo de mineral y del yacimiento. (Quispe, 2019).

e) Costo de venta

El costo de venta en minería es el costo total asociado con la producción y venta de cada unidad de mineral o metal. Este costo incluye

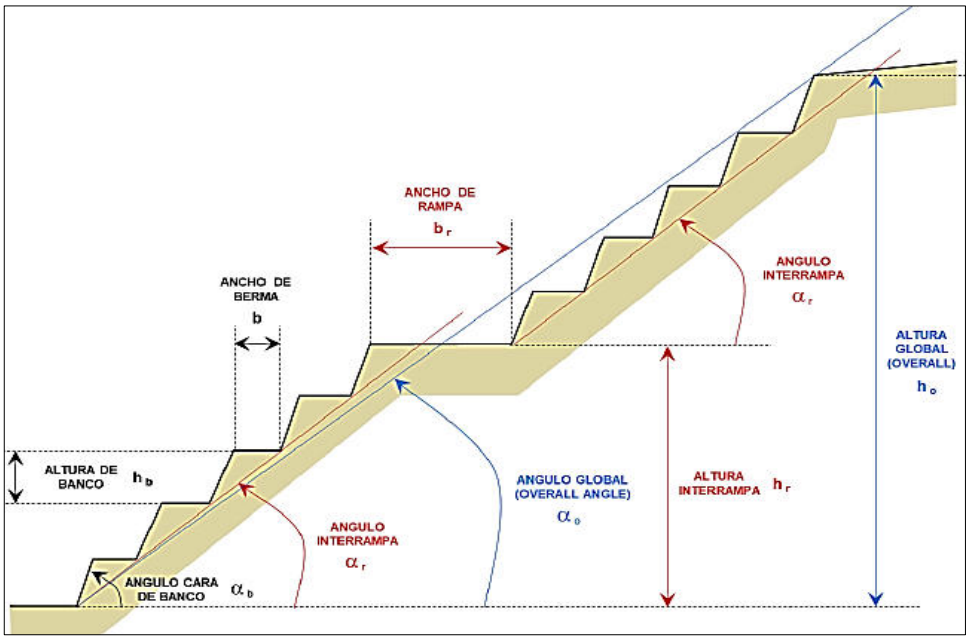
los costos de extracción, procesamiento, transporte y comercialización del producto final. También puede incluir otros costos indirectos relacionados con la operación minera, como los costos administrativos y de mantenimiento.(H. L. Hartman et al., 2017).

2.2.3.4. Parámetros geomecánicos para optimización de pits

Los parámetros geomecánicos en minería son medidas que describen la resistencia y el comportamiento de las rocas en un ambiente minero. Estos parámetros son fundamentales para diseñar excavaciones seguras y eficientes, ya que permiten evaluar la estabilidad de las paredes de la mina, prever posibles fallas y determinar los métodos de excavación más adecuados. (Bieniawski, 1989).

Figura 8

Parámetros geomecánicos de diseño de mina a tajo abierto



Nota. Tomado de *"Incorporación de atributos geometalúrgicos e incertidumbre geológica en la definición del pit final y la secuencia de extracción de largo plazo"*, por Seguel, 2017.

a) **Ángulo global:** Esta representado por el ángulo formado por la horizontal con la recta que une el toe del banco más profundo y la cresta del primer banco.(Cruz, 2023).

b) **Ángulo interrampa:** Ángulo definido por geotecnia, generado por el paquete de bancos situados entre las rampas o catch – berms se mide de toe a toe. (Cruz, 2023).

c) **Ángulo cara de banco:** Definido por la recta que une el toe y cresta de un banco respecto a la horizontal. Constituye también un input de diseño y se relaciona a factores geotécnicos y de los equipos de carguío usados. (Cruz, 2023).

d) **La altura del banco:** en una mina a cielo abierto se refiere a la separación vertical entre cada nivel horizontal. Por lo general, todos los bancos tienen la misma altura, a menos que las condiciones geológicas requieran lo contrario. Esta medida se determina considerando las propiedades físicas del yacimiento, el nivel de selectividad necesario en la extracción del mineral y las dimensiones de los equipos de carga y transporte utilizados. (Seguel, 2017).

e) **El ancho de la rampa:** se refiere al espacio necesario para que pasen los vehículos de transporte. Se determina según las dimensiones de los equipos y consideraciones de seguridad. Por otro lado, la altura del banco en una mina a cielo abierto es la separación vertical entre niveles horizontales. Por lo general, todos los bancos tienen la misma altura, a menos que las condiciones geológicas lo requieran. (Seguel, 2017).

f) **El ancho de la berma:** Corresponde a la distancia horizontal entre el toe del banco y la cresta. (Mendoza, 2021).

2.2.4. Características de optimización de pit en la minería a tajo abierto

La optimización del pit final en la minería a cielo abierto se caracteriza por lo siguiente:

- Se basa en dos elementos clave: un modelo de bloques valorizado y los ángulos de talud por zonas del rajo. Estos ángulos de talud introducen restricciones que afectan el orden de extracción de los bloques (Vergara, 2020).

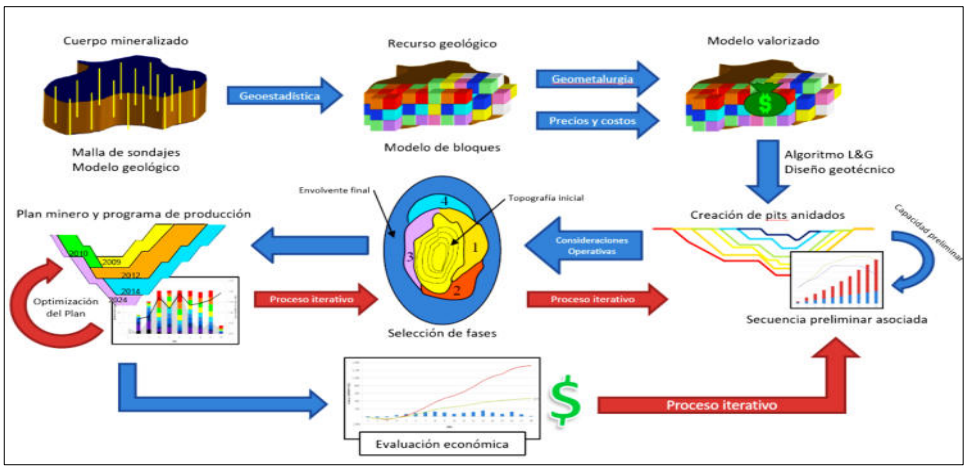
- El objetivo de la optimización es seleccionar los bloques que maximicen las ganancias (Vergara, 2020).
- La elección del pit final depende del criterio utilizado por el planificador, quien evalúa diferentes factores y toma decisiones en función de los objetivos del proyecto (Vergara, 2020).
- Una gran ventaja de establecer el límite del pit final es la capacidad de establecer un fondo de pit mínimo, asegurando que se cumplan las necesidades y requisitos específicos (Vergara, 2020).

El abordaje de los aspectos previamente mencionados, como se destacó al inicio de este capítulo, se ha llevado a cabo descomponiendo el problema en etapas sucesivas, las cuales se presentan en la Figura 9.

a) Evaluación del valor del modelo de recursos mediante la configuración de parámetros de entrada específicos.
b) Establecimiento de los límites finales del tajo, considerando restricciones geométricas y/o geomecánicas.
c) Selección del secuenciamiento de fases iniciales o pushbacks.
d) Formulación de un plan minero que determine estratégicamente la ubicación más adecuada para los bloques contenidos en cada pushback.

Figura 9

Etapas consecutivas en el proceso de planificación minera



Nota. Tomado de. *"Alineamiento de la selección del pit final con la optimización del secuenciamiento estratégico"* (p. 18), por Miranda, 2017.

2.2.5. Tipos de algoritmo de diseño de minas a cielo abierto

a) Algoritmos heurísticos

Estos algoritmos son aquellos donde la solución no se determina en forma directa, sino mediante pruebas, ensayos y reensayos. A pesar de que no existen demostraciones matemáticas que permitan asegurar su validez, estos algoritmos tienen éxito al momento de ser aplicados (Castro, 2021).

b) Algoritmos rigurosos

Estos algoritmos son aquellos cuya optimización tienen una demostración matemática; siendo los más importantes el método de Lerch & Grossmann y modelos matemáticos de flujo máximo.(Castro, 2021).

2.2.5.1. Algoritmo Lerchs & Grossmann

Lerchs & Grossmann propusieron un algoritmo matemático que permite diseñar el contorno de una explotación a tajo abierto con el fin de maximizar la diferencia entre el valor total de la mineralización explotada y el coste total de la extracción del mineral y desmonte (Lerchs & Grossmann, 1965).

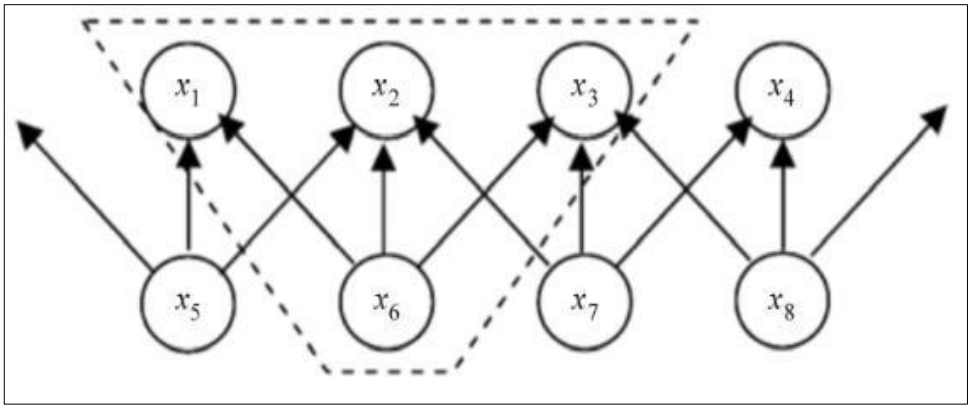
El método de Lerchs & Grossmann se emplea en la planificación minera a cielo abierto con el objetivo de optimizar la forma de la mina para maximizar la ganancia neta. Esto se logra al considerar la geometría de los depósitos minerales y las restricciones económicas y geométricas para determinar la secuencia más eficaz de extracción.

El algoritmo de Lerchs & Grossman se enfoca en definir el tajo final para maximizar la diferencia entre el valor total del mineral extraído y el costo total de extracción del mineral y desmonte. Las únicas restricciones se refieren a la geometría del tajo, el talud de las paredes del tajo no debe superar determinados ángulos que pueden variar con la profundidad del tajo o con el material. Es necesario destacar, el algoritmo se basa en la construcción de tajos anidados con el uso de un factor de ingresos que modula el tamaño de los tajos penalizando el precio en la valoración del

bloque Morales et al., (2015). Según Meaghera et al, (2014), la metodología propuesta por Lerchs & Grossman define el tajo final usando la teoría de grafos donde un grafo dirigido $G = (V, A)$ tal que, un nodo en el grafo representa un bloque en el modelo de bloques y un arco se dirige desde el nodo $xi \in V$ a un nodo $xj \in V$ si el bloque aparentado por el nodo *xi* debe ser eliminado antes del bloque que representa el nodo *xj* (debido a la precedencia del ángulo), así mismo, es posible asignar el peso *ci* al nodo *xi*, donde *ci* es el valor económico del bloque que representa *xi*, entonces, el problema de descubrir un tajo final es equivalente a acertar lo que se conoce como un cierre de grafo máximo en *G* (cierre de grafo), donde, es un subconjunto $V' \subset V$ del conjunto de nodos, tal que ninguna arista va de un nodo en V' a un nodo en $V - V'$.

Figura 10

Cierre de un Grafo

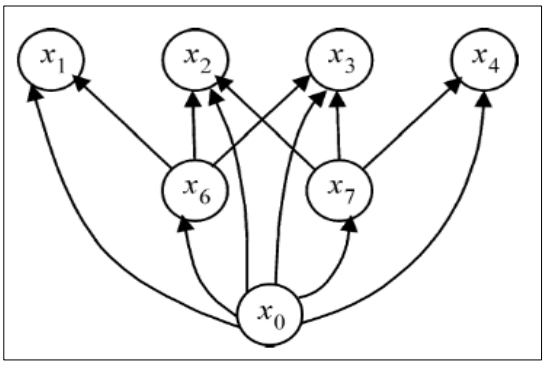


Nota. x1, …, x8 representa lo bloques del modelo de recursos. Tomado de *"Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem"* (p.510), por Meagher et al., 2014.

Un cierre del grafo en *G* representa un diseño físicamente posible para el tajo, considerando la restricción del ángulo o pendiente. Se establece una relación uno a uno entre los diseños de límites factibles y los cierres de grafos, lo que significa que cada diseño de límites se corresponde con un cierre de grafo. Por lo tanto, el cierre de grafo de peso máximo es aquel subconjunto V' de nodos en *V* que maximiza la suma de los valores *cv* de los nodos en V', lo que se traduce en los límites del tajo definitivo.

Figura 11

Grafo Ficticio y Arcos



Nota. Grafo G con el nodo ficticio x0 y arcos adicionados desde el nodo ficticio x0 a todos los demás nodos. Tomado de *"Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem"* (p.511), por Meagher et al., 2014.

El algoritmo de Lerchs & Grossman comienza seleccionando un nodo inicial x0 en el grafo *G* con arcos dirigidos hacia cada nodo. Se define un árbol como un bosque conectado con aristas no dirigidas, y un árbol de expansión *T* de *G* es un subgrafo de *G* en el conjunto de nodos *V(G)* donde las aristas del árbol de expansión son un subconjunto de las aristas de *G* y *T* es un árbol. Una rama *vb* se define como el subárbol del árbol de expansión enraizado en el hijo *v* de *x0*. La masa de una rama es la suma de todos los pesos de los nodos de la rama y se considera fuerte si su masa es positiva y débil en caso contrario.

Según Meaghera et al. (2014), un nodo se clasifica como débil si es miembro de una rama débil (*w*) y como fuerte si es miembro de una rama fuerte (*s*). Además, los arcos se denominan positivos (*p*) si se alejan de la raíz *x0* del árbol y negativos (*m*) si se aproximan.

Durante la aplicación del algoritmo de Lerchs & Grossman, se busca oportunidades de mejora en la forma de la mina mediante la identificación de un arco (*xs, xw*) desde un nodo fuerte *xs* a un nodo débil *xw*. Este arco indica una conexión entre una zona valiosa y una menos valiosa de la mina, que al eliminarse, puede mejorar la eficiencia de la extracción de minerales. Al identificar un arco para eliminar, se fusiona las ramas a las que pertenecen los nodos *xs* y *xw*. Esto implica crear una nueva rama que conecta

directamente la raíz *x0* con el nodo *xw*, eliminando así el arco (*xs, xw*) y mejorando la conectividad de la mina.

En algunos casos, puede surgir la necesidad de realizar una renormalización. Esto ocurre cuando se crea un arco fuerte que no es adyacente a la raíz *x0*. En este caso, elimina el arco creado y se agrega un arco desde la raíz *x0* al nodo apropiado para mantener la conectividad del árbol de expansión y garantizar la integridad de la estructura de la mina.

El algoritmo continúa buscando y eliminando arcos *(xs, xw*) hasta que no pueda encontrar más oportunidades de mejora. Cuando esto sucede, se considera que se ha alcanzado un valor máximo para la forma de la mina y el algoritmo termina, habiendo optimizado la extracción de minerales de manera eficiente y rentable.

2.2.5.2. Algoritmo flujo máximo Pseudoflow

El algoritmo de flujo máximo Pseudoflow constituye una técnica eficiente para abordar el problema del flujo máximo en redes. A diferencia de enfoques convencionales que trabajan con flujos explícitos, este algoritmo utiliza Pseudoflow y se centra en resolver un problema análogo (Hochbaum, 2008).

Según (Deutsch et al., 2022) el algoritmo Pseudoflow es una técnica iterativa para resolver problemas de flujo máximo en redes, especialmente útil en la planificación de minas a cielo abierto. En cada iteración, ajusta un Pseudoflow relajado y un árbol normalizado para cumplir con restricciones de precedencia. Se busca un arco de fusión que represente una violación de restricciones, y el proceso se repite hasta alcanzar una solución final, como el pit final en la planificación minera. Su eficiencia y mejoras en comparación con otros algoritmos lo convierten en una herramienta avanzada en este contexto.

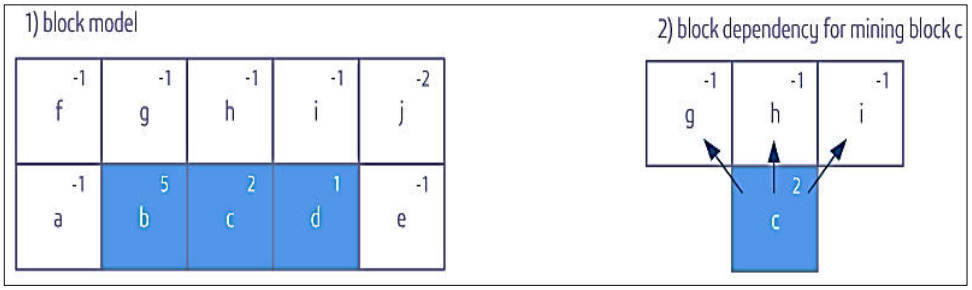
a) Conceptos matemáticos detrás del método flujo máximo Pseudoflow

El proceso de optimización del tajo generalmente utiliza un modelo de bloques con valores de bloques fijos como entrada. Los requisitos de los

taludes del tajo y la secuencia de minería pueden expresarse mediante las dependencias entre bloques. Por ejemplo, en la Figura 12-1, un modelo de bloques 2D simple consta de 10 bloques indexados de *"a"* a *"j"* (el valor está marcado en la esquina superior derecha de un bloque). Para mantener taludes de 45 grados, una dependencia típica entre bloques es como se muestra en la Figura 12-2, es decir, para extraer el bloque *"c"*, primero deben eliminarse los bloques *"g"*, *"h"* e *"i"*. El problema de optimización consiste en encontrar un conjunto de bloques que respete las restricciones de dependencia entre bloques y que ofrezca el mayor valor total de bloques.

Figura 12

Ejemplo de dependencia de bloques en la optimización del tajo

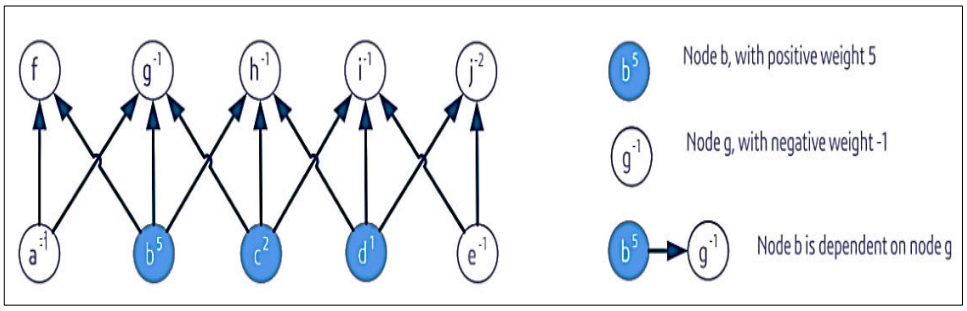


Nota. Tomado de *"Pseudoflow method for pit optimization"* (p.1), por Xiaoyu et al., 2017.

Este problema suele representarse mediante un concepto matemático llamado "grafo". Un grafo es una estructura conceptual que consta de nodos y arcos. En el caso de la optimización del tajo, un nodo representa un bloque, y un arco entre dos nodos representa la relación de dependencia entre dos bloques para la secuencia de excavación y la restricción de pendiente. Un nodo puede llevar un valor de peso, para representar el valor del bloque. La Figura 13 muestra una representación gráfica del problema de optimización del tajo. Utilizaremos este ejemplo para demostrar cómo usar el método basado en grafos para obtener el tajo óptimo. El concepto es general y se puede extender a casos más complejos. Incluso para crear tajos con un gran modelo de bloques 3D, el mismo proceso se aplica, pero con una dimensión y número de nodos y arcos aumentados.

Figura 13

Representación gráfica del problema de optimización de tajos



Nota. Tomado de *"Pseudoflow method for pit optimization"* (p.2), por Xiaoyu et al., 2017.

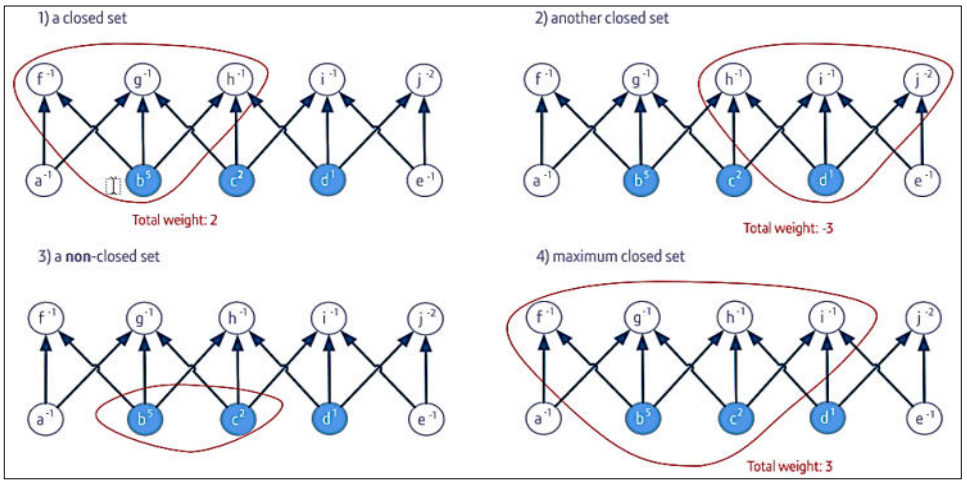
b) Cierre Máximo y Tajo Óptimo

La definición precisa de un tajo con taludes válidos se denomina "conjunto cerrado" o "cierre". Se refiere a un conjunto de nodos que no tienen arcos que salgan del conjunto. Por ejemplo, en la Figura 14, el conjunto {*b, f, g, h*} es un conjunto cerrado y {*d, h, i, j*} es otro conjunto cerrado; pero el conjunto {*b, c*} no está cerrado, porque *"b"* tiene arcos disponibles hacia *"f", "g", "h"*; y *"c"* tiene un arco disponible hacia *"g", "h", "i"*.

Un conjunto cerrado de bloques puede ser eliminado libremente y no depende de la eliminación de otros bloques. Por lo tanto, encontrar un tajo óptimo es el proceso de encontrar un cierre con el valor total máximo. Este problema se denomina problema de cierre máximo. Es fácil observar que el tajo óptimo consiste en el bloque {*b, c, f, g, h, i*}, que tiene un valor total de 3. El algoritmo de Lerchs & Grossmann funciona buscando directamente el cierre máximo.

Figura 14

Cierre máximo de un grafo



Nota. Tomado de *"Pseudoflow method for pit optimization"* (p.2), por Xiaoyu et al., 2017.

c) Método de flujo máximo - una alternativa para generar un tajo óptimo.

La investigación ha demostrado que buscar directamente el cierre máximo no es el método más eficiente para encontrarlo. Se ha comprobado un método más eficiente que implica resolver una versión variante de un grafo, es decir, un grafo de flujo o red de flujo. Para facilitar la comprensión, un ejemplo de un grafo de flujo sería una red de tuberías para enviar agua de una ciudad a otra. Un grafo de flujo contiene dos nodos especiales adicionales, el nodo fuente (donde comienza el flujo) y el nodo sumidero (donde termina el flujo). Además, cada arco, como una tubería, tiene una propiedad de capacidad y permite que pase un flujo, hasta el límite de capacidad, a través de él. El flujo y la capacidad a lo largo de un arco deben ser positivos. Los nodos representan una unión de tuberías, por lo que la cantidad de flujo que entra en un nodo debe ser igual al flujo total que sale del nodo, lo que se denomina criterio de equilibrio de flujo. En esta red, buscar una distribución de flujo con flujos totales máximos que se muevan hacia el nodo sumidero (o que salgan igualmente del nodo fuente) se denomina problema de flujo máximo. Se ha demostrado que el problema de flujo máximo es equivalente al problema de cierre máximo.

Para obtener un grafo de flujo, necesitamos hacer algunos cambios en el grafo de la Figura 13:

- Agregar dos nodos especiales: nodo fuente y nodo sumidero.
- Para todos los arcos existentes (en azul), asignar capacidades infinitas.
- Agregar enlaces desde la fuente a todos los nodos positivos, con capacidades iguales al peso de los nodos.
- Agregar enlaces desde los nodos negativos al sumidero, con capacidades iguales al valor absoluto del peso de los nodos.
- Eliminar los pesos en los nodos.

El grafo de flujo convertido se muestra en la Figura 15-1. También damos un ejemplo de flujos asignados arbitrariamente que satisfacen el equilibrio de flujo, mostrado en la Figura 15-2.

La relación entre el flujo y los conceptos de minería no es tan directa como la relación entre un cierre y una mina. Una forma de describir esto es considerar el mineral como el agua almacenada en una ciudad de origen que necesita ser enviada a una ciudad de destino a través de una red de tuberías. La estación de origen conecta todos los bloques de mineral, y el destino conecta todos los desechos. En la red, el valor económico de un bloque no se refleja en un nodo, sino que se mide por la capacidad de la tubería (arco) que lo conecta con la ciudad de origen o de destino. Dado que las tuberías que representan la dependencia de los bloques tienen capacidad ilimitada, los cuellos de botella de las redes son las tuberías conectadas a la fuente o al destino. Se pueden identificar tres tipos de tuberías: "desecho-a-destino", "origen-a-mineral" y "bloque-a-bloque". La asignación de flujo en cada tipo de tubería se puede interpretar en diferentes sentidos de minería, respectivamente:

1. Empujar el flujo desde un "nodo de desecho" hacia un destino es similar a utilizar el valor subyacente del mineral para pagar el bloque de desecho. Cuando un flujo satura una tubería que se conecta al destino

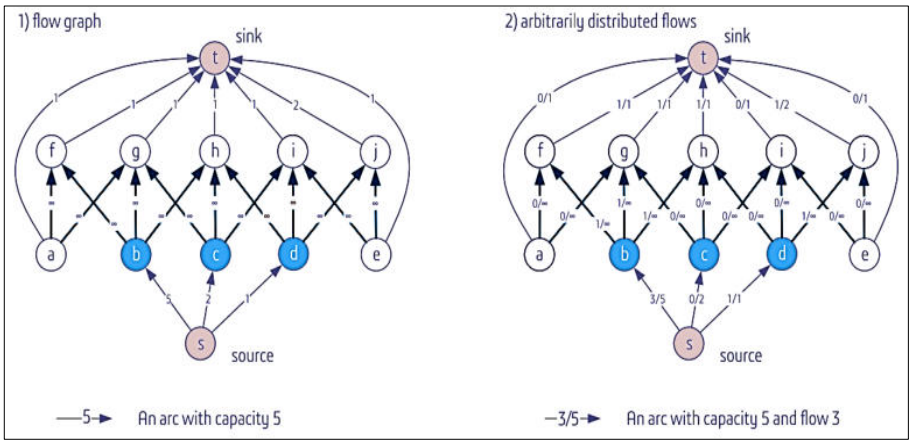
(la cantidad de flujo es igual a la capacidad), significa que el bloque de desecho correspondiente puede ser pagado por sus minerales subyacentes, por ejemplo, el nodo *"f", "g"* y *"h"* en la Figura 15-2. De lo contrario, si una "tubería de desecho a destino" no está saturada, entonces el bloque de desecho no está pagado por los minerales, como los nodos *"a", "i", "j"* y *"e"* en la Figura 15-2. El criterio de equilibrio de flujo implica que el flujo que entra en un "nodo de desecho" no puede exceder su capacidad de salida (valor absoluto del bloque), garantizando así que el bloque de desecho no sea pagado varias veces.

2. Empujar flujos desde una fuente hacia un "nodo de mineral" significa pasar el valor del mineral hacia abajo, dentro de los límites de capacidad, para pagar los desechos necesarios. Si una tubería "origen a mineral" no está saturada mientras que al mismo tiempo el flujo está equilibrado y no se puede empujar más aguas abajo, como la tubería "*s*-*b*" en la Figura 15-2, esto significa que el mineral es suficiente para pagar los desechos superiores y tiene valor residual restante. De lo contrario, si un bloque de mineral no es lo suficientemente alto para pagar los desechos vinculados, entonces la tubería conectada a la fuente estaría saturada, como la tubería "*s*-*d*" en la Figura 15-2.

3. Las tuberías de capacidad ilimitada que vinculan bloque a bloque guían el flujo hacia los "nodos de desecho" relacionados y permiten que el valor del mineral pase libremente para pagar todos los desechos superiores. Cuando se encuentra el flujo máximo, se garantiza que todos los minerales se han utilizado para pagar los desechos necesarios. Como ejemplo contrario, en la Figura 15-2, el nodo *"c"* no se considera que esté pasando ningún flujo. Por lo tanto, el flujo total es 4 y no ha alcanzado el flujo máximo de 5 (mostrado en la siguiente sección), por lo tanto, se necesita una distribución adicional para alcanzar el flujo máximo.

Figura 15

Grafo de flujo convertido de la Figura 13

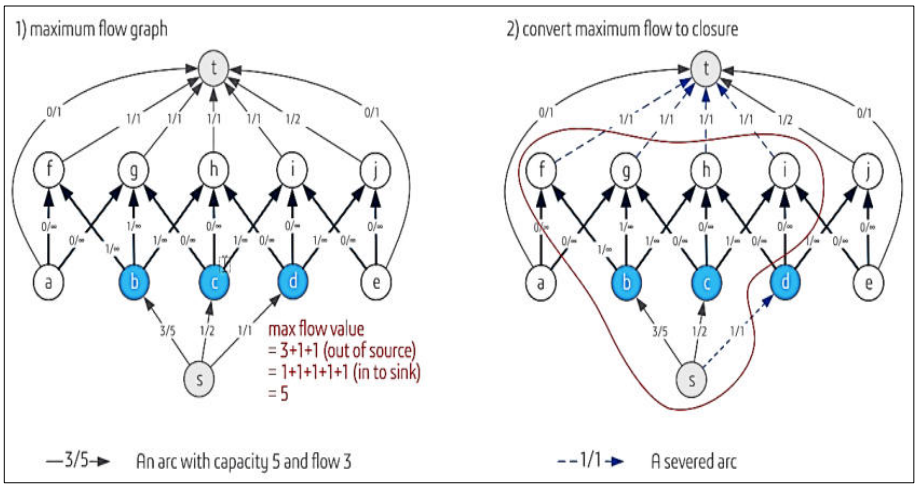


Nota. Grafo 15-2 Flujos distribuidos arbitrariamente del Grafo 15-1 que satisfacen los criterios de equilibrio de flujo. Tomado de *"Pseudoflow method for pit optimization"* (p.3), por Xiaoyu et al., 2017.

Supongamos que se encuentra una solución de flujo máximo como se muestra en la Figura 16-1, mediante cualquier método posible, como el Pseudoflow. Para obtener el tajo óptimo, aún necesitamos convertir la solución de flujo máximo en un cierre máximo. Para hacer esto, primero rompemos los arcos saturados (arcos punteados azules en la Figura 16-2). Esto separa el nodo sumidero de los bloques de desecho que pueden ser pagados por los bloques de mineral subyacentes como los bloques *"f", "g", "h"* e *"i"*, y también corta los caminos desde el nodo fuente hasta los bloques de mineral que no pueden costear los valores de los desechos superiores como el bloque *"d"*. Luego buscamos todos los nodos que pueden ser alcanzados por el nodo fuente, como se muestra en la Figura 16-2. Estos nodos excepto el nodo fuente forman el conjunto de cierre máximo. La razón para esto está relacionada con el teorema del máximo flujo mínimo corte, que demuestra la equivalencia entre el flujo máximo y el corte mínimo en un grafo. Esta demostración es fundamental en el artículo de investigación para establecer la relación entre el flujo máximo y el cierre máximo en el contexto del algoritmo de Lerchs & Grossman.

Figura 16

Encontrar tajos óptimos en el grafo de flujo máximo



Nota. Tomado de *"Pseudoflow method for pit optimization"* (p.4), por Xiaoyu et al., 2017.

d) Factores que influyen en la velocidad de optimización

Varios factores pueden influir en la velocidad de optimización, especialmente en el tiempo de cálculo del proceso. Estos factores pueden variar y afectar la eficiencia de la optimización (Bai et al., 2017).

- Número de bloques
- Número de arcos, relacionado con el ajuste de la pendiente y el tamaño del bloque
- La distribución de los valores de los bloques
- El hardware y el sistema informático

Las pruebas realizadas en este estudio no cubren todos los factores posibles, sino que se enfocan en comparar los tiempos entre modelos de bloques de diferentes tamaños, que suele ser el factor más importante. En algunos casos, especialmente para modelos de bloques pequeños o medianos, es posible que el método de Pseudoflow no resulte significativamente más rápido que el método de Lerchs & Grossman.

2.2.5.3. Límite final de una mina a cielo abierto

El límite final de una mina es la frontera que define hasta dónde es conveniente extender una operación minera, como se visualiza en la Figura 17. En el caso de una mina a cielo abierto, este límite se conoce como tajo final y en una mina subterránea, se le denomina envolvente final. La definición de este límite es atemporal, en el sentido de que es conveniente extraer cualquier tonelada que cubra su costo marginal independiente del tiempo en que se extrae (Castro, 2021).

El diseño del límite final de una mina se basa en un análisis detallado que considera las características del yacimiento, las condiciones geomecánicas, los factores de seguridad a emplear y los requerimientos operacionales mínimos de los equipos. En relación al cálculo del pit final se realiza mediante la aplicación de algoritmos de optimización. Estos algoritmos utilizan un grafo definido por las relaciones de precedencia vertical, tomando en cuenta el ángulo total de talud. Se determina un conjunto de bloques que preceden a cada bloque en función de estas relaciones. Además, se asigna un valor a cada bloque considerando los ingresos y costos asociados a la extracción y posible procesamiento. La máxima clausura de este grafo, interpretada como el subconjunto de bloques con el mayor valor económico, define el diseño final de la excavación o pit final.

a) Ultimate pit

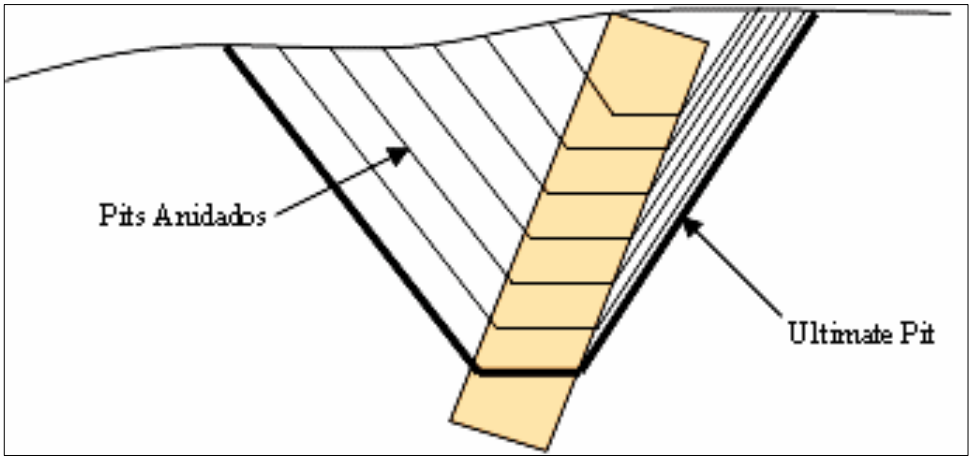
El proceso de planificación para evaluar el valor y la forma de explotación de una mina implica varias etapas, desde la creación de un modelo tridimensional del yacimiento hasta la evaluación económica del programa de producción. Uno de los desafíos más complejos en este proceso es la determinación de los límites del pit, que no siempre resulta en una solución óptima. Esta tarea involucra considerar diversas variables como las leyes de los minerales, densidad de rocas, características geológicas, geotécnicas y metalúrgicas, dilución y recuperación de minerales, tasas de producción, precios de los metales, costos de operación y restricciones mineras.

Estas variables están interrelacionadas; por ejemplo, un aumento en la tasa de producción puede llevar a mayores costos e inversión, reduciendo la vida útil de la mina y afectando la recuperación. Sin embargo, muchos algoritmos de optimización actuales no consideran todas estas variables, lo que puede resultar en límites de pit subóptimos.

A medida que avanza la planificación, se generan varios límites de pit, desde el más óptimo hasta el menos óptimo. El primer paso es determinar el límite de pit que maximiza el flujo de caja de la mina, considerando solo el ángulo de los taludes que soportan el cuerpo mineralizado y la roca estéril. Este pit se conoce como Ultimate Pit y se obtiene mediante algoritmos de optimización. Luego, mediante técnicas paramétricas y los mismos algoritmos, se definen pits intermedios llamados Pits Anidados, que establecen la secuencia de explotación. Finalmente, aplicando algoritmos de optimización para programas mineros, se genera un programa de producción y diseños detallados de la mina, incorporando aspectos operacionales como accesos y geometría de los bancos. Este pit final se conoce como pit final operativo.

Figura 17

Pits anidados y ultimate pit



Nota. Pits anidados y ultimate pit. Tomado de "*Incorporación del valor del dinero en el tiempo para la determinación de límites económicos de un open pit*" (p. 12), por Latorre, 2015.

b) Pit Shells

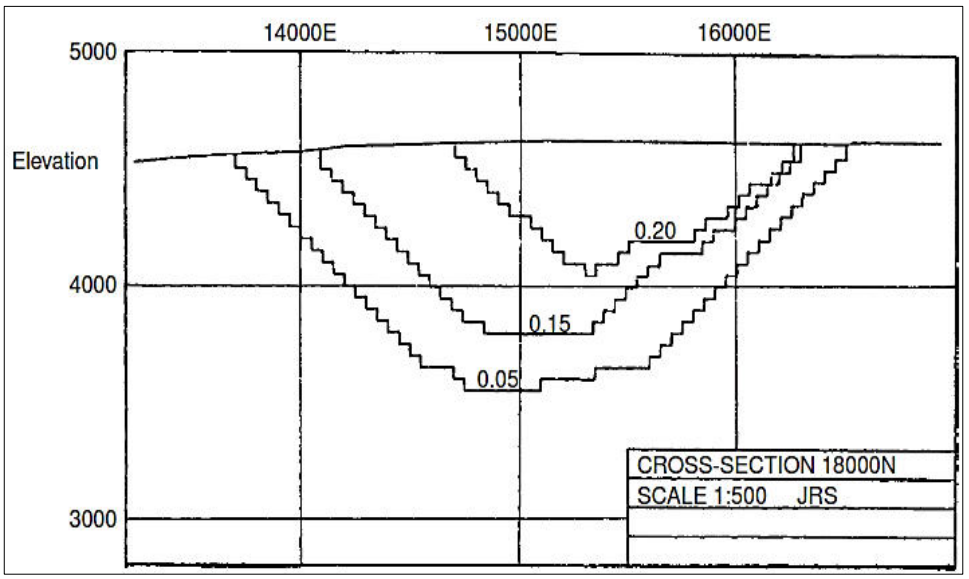
Una de las técnicas más comunes para planificar la extracción en una mina a cielo abierto es crear un conjunto de pits shells con diferentes leyes de corte (Hustruild & Kuchta, 2006).

Esto se logra ajustando la ley de corte en cada pit mediante un factor de ingresos que afecta el precio del metal, lo que permite obtener diferentes configuraciones de pits anidados. El límite del pit final se determina con base en el precio más probable del metal durante la vida útil del proyecto, lo que significa que precios más bajos conducirán a límites de pits más pequeños con menos extracción de material estéril o más contenido metálico disponible.

Observar estos pits en conjunto puede proporcionar una idea de la dirección preferida para la extracción y los límites económicos para las fases de extracción. Sin embargo, esta técnica tiene sus desventajas en términos económicos, operativos y de seguridad, y no es la única opción disponible. La Figura 18 muestra una vista en sección de tres pit shells.

Figura 18

Vista en sección de 3 pit shells



Nota. Vista en sección de pit shell. Tomado de: *"Open pit mine planning and design", por* Hustrulid et al., 2013.

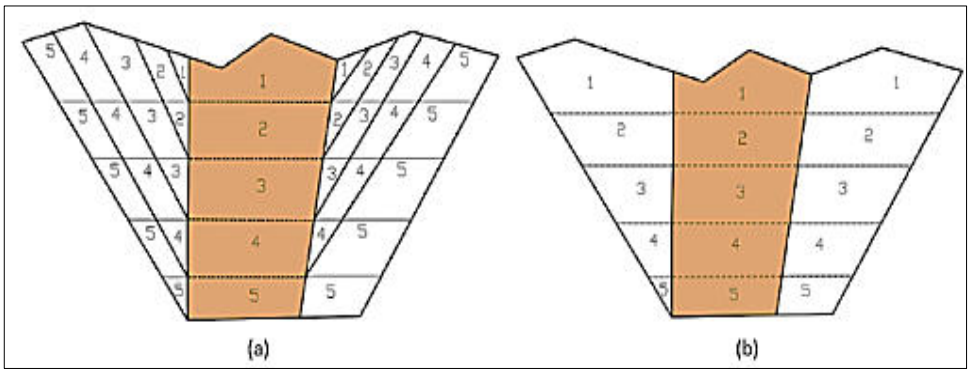
2.2.6. Evaluación económica y selección del pit final

Después de generar los pits anidados, se realiza una evaluación económica preliminar para seleccionar el pit final optimizado. Para esto, se establece un escenario económico que incluye un precio base, la producción de la mina y planta, la tasa de descuento, los costos administrativos y de venta, entre otros. En esta evaluación, se calcula el VAN asociado a dos secuencias de extracción: el worst case y el best case.

En la Figura 19 se puede observar ambos casos empezando por el escenario worst case, este representa la implementación del plan minero mediante la extracción por bancos, es decir, extrayendo el material de cada pit anidado de manera secuencial. Por otro lado, el escenario best case corresponde al plan resultante de la extracción de cada pit en su totalidad antes de pasar al siguiente, lo que implica que no se puede acceder al siguiente pit hasta que el pit actual haya sido completamente extraído.

Figura 19

Secuencias de extracción best case y worst case



Nota. (a) Best case y (b) Worst case asociado a los periodos de extracción. Tomado de: *"Aplicación de inteligencia artificial para el agendamiento y optimización del diseño de fases en minería a cielo abierto"* (p.7) *por* Loor, 2020.

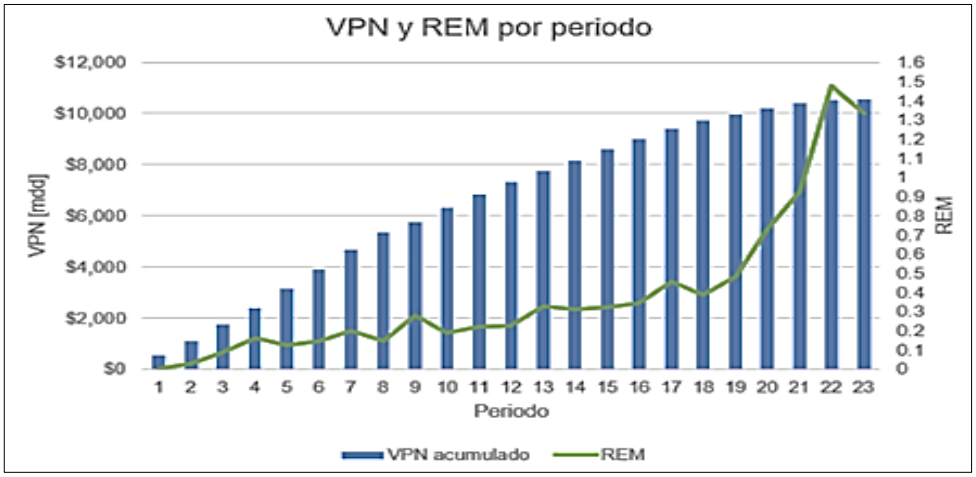
a) Análisis pit by pit

El diseño del pit final en la minería se determina mediante un análisis financiero de las expansiones, conocidas como pushbacks, que resultan de

la optimización del modelo de bloques. Estos pushbacks definen la geometría de la mina y establecen los límites de la explotación. El análisis pit by pit es una herramienta determinista que se utiliza para definir el número de pushbacks y, por consiguiente, el pit final. La relación estéril-mineral de cada pushback es crucial para determinar las ganancias del proyecto, ya que se observa en la gráfica cómo estas están directamente relacionadas con el número de pushbacks.

Figura 20

Relación estéril-mineral y valor presente neto



Nota. Serie de pushbacks con su respectivo VAN y REM. Tomado de *"Planeación a Largo Plazo de Minas a Cielo Abierto con Mineplan 3D"* (p.36), por Pérez, 2023.

Los pushbacks son fundamentales para el diseño operativo de una mina y para planificar las fases de explotación. Constituyen el primer paso para obtener el diseño final del pit operativo.

2.2.7. El Diseño Del Pit By Pit Graph

Se trata de una herramienta versátil y significativamente diseñada que integra un escenario de producción considerando las limitaciones operativas tanto de la planta de concentración como de la mina. Además, incorpora factores económicos como la tasa de descuento de mercado. A partir de estos elementos, se genera un gráfico que muestra los resultados técnicos y económicos de los distintos pits anidados en el yacimiento.

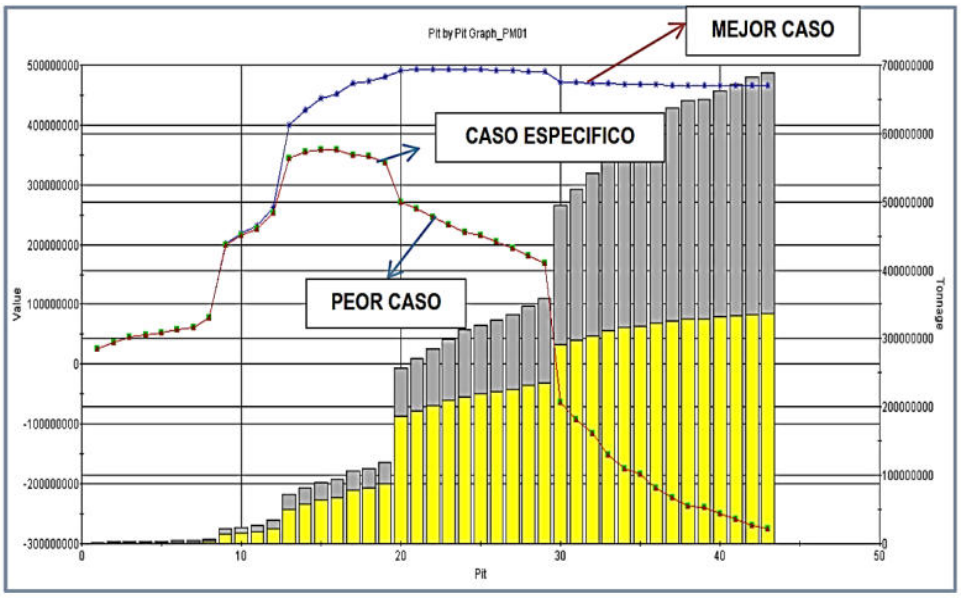
En la Figura 21 de Pit by Pit Graph, está compuesto de tres gráficas:

a) El Best Case o el mejor caso.
b) El Specified Case o el caso específico.
c) El Worst Case o el peor caso.

Cada gráfica lineal se configura de manera única en un escenario hipotético de producción. La elaboración del mejor caso se realiza aplicando principios de valor actual neto y siguiendo una secuencia de extracción por fases de minado. En contraste, el peor caso se configura utilizando la secuencia de extracción a banco completo o mediante una relación estéril-mineral descendente.

Figura 21

Pit by Pit Graph



Nota. Tomado y editado de, *"Optimizar el planeamiento a largo plazo de la mina a tajo abierto Tacaza-CIEMSA empleando los softwares mineros Gemcom Whittle y Minesight"* (p.41), por Chura, 2019.

2.2.8. Indicadores económicos de un proyecto

La Evaluación Económica de Proyectos tiene por objeto proveer un elemento cuantitativo para la toma de decisión de la viabilidad del Proyecto el cual comprende los siguientes aspectos: Aspectos Técnicos, Aspectos Económicos, Aspecto Financiero y el Riesgo de la Inversión. (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2012)

El aspecto o análisis económico maneja exclusivamente el modelo económico de la inversión, el cual es una sucesión temporal de flujos de dinero positivos o negativos considerando como punto indispensable del valor temporal del dinero o valor cronológico del dinero. El concepto de este término considera que el dinero tiene un coste de utilización significativo, dicho coste se puede presentar en forma de intereses que es necesario desembolsar o bien como el coste de oportunidad equivalente a los que se obtendría en invertir en otros proyectos.

Habitualmente se trabaja con una tasa de interés que se expresa como un porcentaje del capital y que se refiere a un cierto periodo de tiempo.

2.2.8.1. Valor Actual Neto

El valor actual neto se refiere al valor presente de los beneficios netos generados por un proyecto a lo largo de su vida útil. Este cálculo implica descontar dichos beneficios a una tasa de interés que refleje el costo de oportunidad asociado con el capital que el inversionista planea invertir en el proyecto. En otras palabras, el VAN representa la rentabilidad efectiva de la mejor alternativa especulativa de igual riesgo (Gonzales, 2010).

Valor Actual Neto (US$)

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(1+k)^t} \qquad (2)$$

Donde:

F_t : Flujos de dinero en cada periodo t.

I_0: Inversión realizada al momento inicial (t = 0).

n: Número de periodos de tiempo.

k : Tasa de descuento aplicado a la inversión.

- Un $VAN > 0$ indica que, a la tasa de descuento elegida, el proyecto generará beneficios.
- Un $VAN = 0$ indica que el proyecto no generará beneficios ni pérdidas.
- Un $VAN < 0$ indica que el proyecto generará pérdidas, por lo que deberá ser rechazado.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

2.3.1. Pit final

El término "pit final" en el ámbito minero se refiere al diseño definitivo de una excavación a cielo abierto, como una mina o cantera. Este diseño determina la configuración óptima en términos de forma y profundidad para extraer eficientemente los recursos minerales, considerando aspectos geológicos, económicos y operativos con el objetivo de maximizar la recuperación de minerales y minimizar los costos asociados (Peirano, 2011).

2.3.2. Yacimiento

Un yacimiento es una acumulación natural de minerales en la corteza terrestre, en cantidades suficientes para ser extraídos con beneficio económico. (Herrmann & Zappettini, 2014)

Los yacimientos son el resultado de procesos geológicos que ocurrieron en determinadas épocas y en sitios específicos del planeta, y su formación está condicionada por las particularidades locales de la corteza terrestre, como el movimiento, grosor, flujo de calor, entre otros. (Herrmann & Zappettini, 2014)

2.3.3. Modelo de bloques

El modelo de bloques es una matriz tridimensional mediante la subdivisión de un cuerpo geológico en bloques más pequeños de tamaño y forma uniformes. Cada bloque individual tiene la capacidad de almacenar información inherente al yacimiento, como leyes minerales, cantidades, densidades, costos, detalles estructurales, consideraciones técnicas, entre otros (Chura, 2019).

2.3.4. Zonas geotécnicas

Una zona geotécnica en minería es un área específica dentro de un yacimiento minero que comparte características geológicas y geotécnicas similares. Estas zonas se identifican y delimitan para comprender mejor las condiciones del terreno, la estabilidad de las paredes de los tajos, y para adaptar las prácticas de extracción y diseño de la mina a estas condiciones particulares (IIMP, 2018).

2.3.5. Evaluación económica

Involucra la evaluación exhaustiva de los costos y beneficios económicos de las actividades mineras, teniendo en cuenta los ingresos derivados de la venta de minerales, los costos de operación y de inversión, así como otros aspectos económicos que afectan su rentabilidad (Caxi, 2017).

2.3.6. Ley de corte

La ley de corte se define como el umbral que generalmente se utiliza para distinguir entre los materiales minerales destinados a diferentes procesos y desechos (Gonzales, 2010).

2.3.7. Costo

Es la cantidad de dinero que una persona o empresa tiene que sacar de su billetera, cartera o cuenta bancaria para comprar algún bien o servicio (Runge, 1998).

2.3.8. Revenue Factor

El Revenue Factor, o factor de ingresos, desempeña un papel crucial en la evaluación económica de proyectos mineros. Este factor constituye un multiplicador que se aplica al precio de venta del mineral con el fin de crear escenarios variados y examinar cómo afectan a la rentabilidad global del proyecto (Marquina, 2023).

2.3.9. Stripping ratio

Se define como la razón entre la cantidad de estéril que se debe extraer para arrancar una unidad de mineral con destino a proceso o a stockpile. En general, mientras más alta sea la relación estéril-mineral, mayores serán los costos de extracción (Miranda, 2017).

2.3.10. Extracción minera

Proceso de recuperación de minerales y materiales valiosos de la tierra. Este proceso puede implicar la remoción de grandes cantidades de material para acceder a los depósitos de minerales, seguido de la extracción selectiva del mineral de interés. La extracción puede realizarse a cielo abierto o en minas subterráneas, dependiendo de la ubicación y la naturaleza del depósito mineral.(Hartman et al., 2018).

2.3.11. Chancado y molienda

Proceso de reducción del tamaño de las rocas extraídas a través de la trituración y la pulverización. El chancado reduce el tamaño de las rocas a fragmentos más pequeños, mientras que la molienda reduce estos fragmentos a partículas aún más finas, facilitando así la liberación de los minerales valiosos contenidos en las rocas (Wills & Finch, 2016).

2.3.12. Flotación

La flotación en la minería es un proceso físico-químico utilizado para separar selectivamente los minerales valiosos de los minerales no deseados en una suspensión acuosa. Este proceso se basa en la capacidad de

ciertos minerales de adherirse a burbujas de aire, lo que les permite elevarse a la superficie y formar una espuma que puede ser recolectada (Wills & Finch, 2016).

2.3.13. Fundición

La fundición es un proceso metalúrgico en el cual se obtiene metal a partir de minerales mediante la aplicación de calor. En este proceso, calentamos el mineral a altas temperaturas en un horno especial para separar el metal de los componentes no metálicos, como el óxido y la ganga. Esto produce un metal líquido que luego se puede moldear y enfriar para obtener piezas metálicas (Wills & Finch, 2016).

2.3.14. Refinación

La refinación en minería es el proceso mediante el cual se purifica un metal o mineral para eliminar impurezas y obtener un producto final de alta pureza. Esto puede implicar la fundición del metal seguida de procesos químicos o físicos adicionales para refinar aún más el material (Wills & Finch, 2016).

2.3.15. Bast case

La secuencia describe un proceso en el que se extrae mineral de manera temprana, generando ganancias iniciales significativas. Sin embargo, la extracción se ve interrumpida porque no se cumplen los requisitos espaciales necesarios para continuar el desarrollo. A pesar de esta interrupción, esta fase inicial proporciona una indicación del valor final del proyecto, lo que permite analizar los efectos de introducir limitaciones en el plan de producción (Ccahuana, 2023).

2.3.16. Worst case

Esta secuencia se considera desfavorable debido a la extracción inicial de una gran cantidad de material estéril. Esto provoca un retraso en la extracción del mineral y, como resultado, también en la generación de ingresos (Ccahuana, 2023).

2.3.17. Mineplan project evaluator

Mineplan project evaluator es una herramienta para planificación minera para generar tajos finales, además de una abundancia de nuevas funcionalidades en cuanto a programación estratégica. Mineplan project evaluator cuenta con una interfaz moderna y permite a los planificadores analizar múltiples escenarios potenciales tanto en la optimización del tajo como en el proceso de programación utilizando herramientas robustas de gestión de casos (HexagonMining, 2020).

III. METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

De acuerdo al fin que persigue, la investigación es aplicada porque "está dirigida a una utilización inmediata y no al desarrollo de teorías, además se aplica la investigación a problemas concretos en circunstancias y características concretas" (Rodriguez, 2005).

Esta investigación está bajo un enfoque cuantitativo porque tiene dos características principales: es secuencial y probatoria. La naturaleza de este enfoque está en la recolección de datos para probar la hipótesis con base en la medición numérica y en el análisis estadístico con el objetivo de establecer resultados. Asimismo, se puede precisar que del problema de investigación se establecen las hipótesis que están constituidas por las variables y que demandan establecer un plan para poder probarlas; en consecuencia, estas variables deben ser determinadas en un contexto, se analizan las mediciones obtenidas a través de métodos estadísticos para poder establecer conclusiones. (Hernández et al., 2014).

El diseño es experimental, según Vara (2010), se manipula una variable independiente mientras se mide una variable dependiente en dos momentos distintos: antes de la manipulación de la variable independiente, para establecer una línea base con los valores iniciales (conocida como "pre test"), y después de la manipulación, para medir los cambios ocurridos (conocida como "pos test").

3.1.2. Nivel de investigación

De acuerdo a la investigación planteada es descriptiva comparativa que recolecta información relevante en varias muestras a un mismo fenómeno o aspecto de interés y luego caracteriza este fenómeno en base a los datos recogidos, de tal manera que se pueda hacer esta comparación con los datos globales o en alguna categoría de ellos (Condori Ojeda & Paniagua Machicao, 2018).

3.2. ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL

La unidad minera Cuajone se caracteriza por ser un depósito de tipo pórfido de cobre y molibdeno (Cu-Mo), ubicado en el distrito de Torata, provincia Mariscal Nieto, departamento de Moquegua. Este yacimiento está delimitado dentro de los cuadrángulos (34U) y Moquegua (35U), y su localización detallada se puede apreciar en la Figura 22. Según sus coordenadas, se sitúa en la zona UTM 19, con una altitud que varía entre los 2950 y 3880 metros sobre el nivel del mar m.s.n.m. (INGEMMET, 2018).

Tabla 3

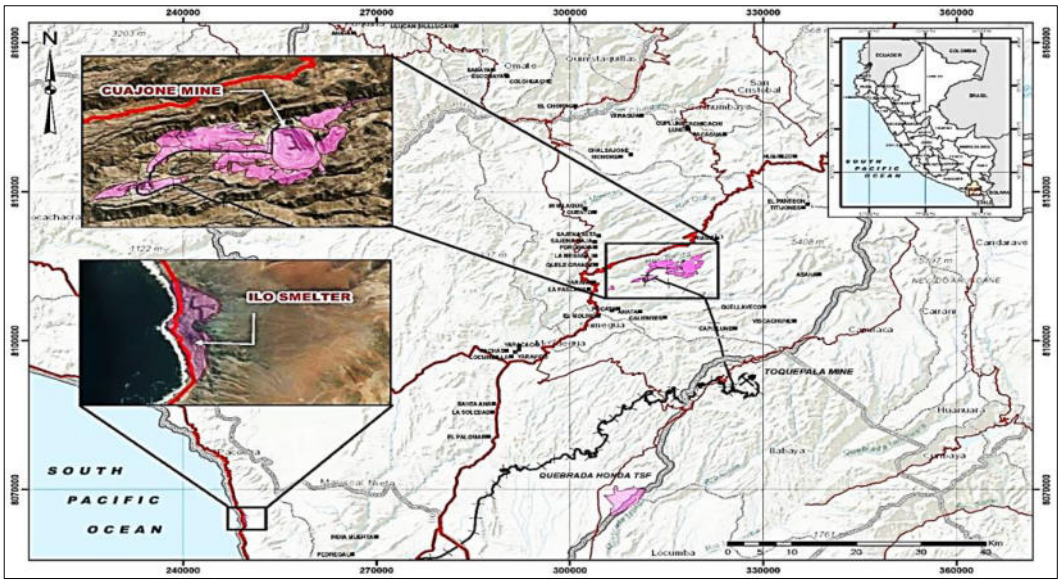
Ubicación en coordenadas UTM WGS84

Este	Norte
317685	8117350
319515	8115815

Nota. Tomada de "*Caracterización petromineralógica de yacimiento Toquepala y Cuajone*" (p.13), por INGEMMET boletín serie b: geología estructural, 2018.

Figura 22

Ubicación de la unidad minera Cuajone



Nota. Tomado de *"Cuajone Operations Peru Technical Report Summary"* (p.43), por Wood Group, 2022.

3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población

La población para el proyecto de investigación está conformada por la unidad minera Cuajone.

3.3.2. Muestra

La muestra a considerar para la presente investigación destaca los pit shells generados a través de los algoritmos de optimización de pit, como flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman, en base a los parámetros técnico-económicos utilizados de la unidad minera Cuajone del reporte técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary".

3.4. INSTRUMENTOS

3.4.1. Técnica de recolección de datos

Los datos para la optimización del pit utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman se extrajeron del informe técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary 2022" cuya información es de dominio público. Estos datos incluyen el costo de minado, procesamiento y el porcentaje de recuperación metalúrgica, los cuales se detallan en la Tabla 7.

3.4.2. Instrumentos para el procesamiento de datos

Para delimitar el límite del pit final, se utilizará el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow y el algoritmo Lerchs & Grossman a través del software HxGN MinePlan 15.8, específicamente en el módulo Project Evaluator.

El respectivo cálculo de la rentabilidad económica, el cual entregará el mayor VAN a través del análisis del gráfico pit by pit, y el registro de eficiencia de optimización de cada algoritmo de optimización empleado en la generación de pit shells, se realizará en Microsoft Excel. Con respecto a los recursos computacionales utilizados, éstos constan de lo siguiente: El computador utilizado corresponde a una laptop con procesador de 11th Gen Intel(R) Core (TM) i5-11400H @ 2.70GHz, de memoria RAM de 16 GB y tarjeta gráfica Nvidia Geforce GTX 1650.

3.5. PROCEDIMIENTOS

La presente investigación se basará en la recopilación de información verídica y tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de la planificación minera, centrándose específicamente en la determinación del pit final a través de la comparación de eficiencia en tiempos de optimización de pit shells a través de los algoritmos flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman. Se utilizará un diseño de investigación cuantitativa, que implicará la recopilación y análisis de diversos datos y variables definidas, con el fin de respaldar la hipótesis planteada.

3.5.1. Etapa preliminar

En primer lugar, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para estudiar la delimitación del diseño del pit final en minas a tajo abierto y el modelo matemático flujo máximo Pseudoflow. Además, se establecieron los objetivos de la investigación, los cuales fueron utilizados como guía durante todo el proceso. Asimismo, se definieron los procedimientos y técnicas a utilizar.

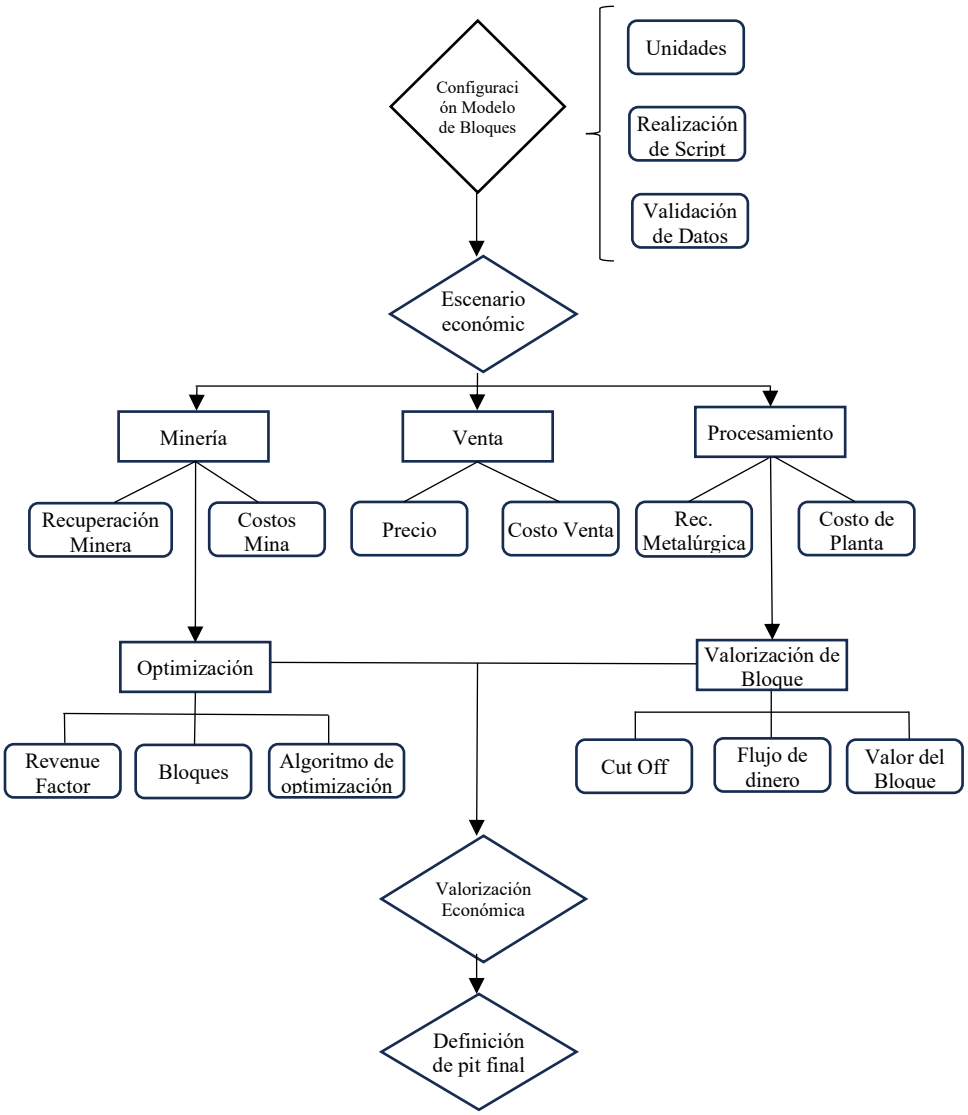
En esta etapa, se recopilaron los datos necesarios. Se registraron variables como la geometría del tajo, la ley del mineral, los costos de extracción y de procesamiento. Posteriormente, se procedió al uso de los algoritmos de optimización utilizando los datos recopilados. Además, se evaluaron los resultados preliminares obtenidos de la delimitación del pit final, analizando su viabilidad y eficacia en relación con los objetivos establecidos.

3.5.2. Etapa de gabinete

En esta etapa, se llevó a cabo un análisis detallado de los resultados obtenidos. Se evaluó la eficiencia del método flujo máximo Pseudoflow con respecto al utilizado comúnmente y más comercial como es el método de optimización Lerch & Grossman en la delimitación del Pit final. Se interpretaron los resultados obtenidos y se realizó la elaboración del informe final de la tesis. En la Figura 23 se detalla el proceso de optimización y recolección de datos para la delimitación del Pit final.

Figura 23

Diagrama de flujo de optimización de pit



Nota. Secuencia de optimización en el software HxGN MinePlan. Elaboración propia.

3.5.3. Confiabilidad

Para asegurar la confiabilidad, se utilizará el informe técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary" (Wood Group, 2022). Los cuales, al ser información de dominio público, refuerzan la transparencia y accesibilidad de los datos. Estos informes, reconocidos por su precisión y profundidad, constituirán la base de datos confiable para respaldar las conclusiones de la investigación.

3.6. ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de datos de este proyecto de investigación, se emplearán las siguientes técnicas y herramientas:

Utilizaremos el software HxGN MinePlan 15.8 para procesar los datos a través del módulo Project Evaluator. Emplearemos el algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow y el algoritmo Lerch & Grossman para generar los pit shells de acuerdo al revenue factor aplicado al precio del cobre para generar los distintos escenarios económicos, basados en los parámetros técnico-económicos y zonas geotécnicas. Además, analizaremos los datos y el valor actual neto para determinar la mayor rentabilidad, así como el análisis de eficiencia de optimización en la generación de pit shells por cada algoritmo de optimización. Toda esta información será procesada y analizada en el programa Excel para calcular los siguientes indicadores:

- Determinar el precio del cobre
- Determinar el Pit Shell optimo
- Valor actual neto
- Eficiencia de optimización por cada algoritmo de optimización empleado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

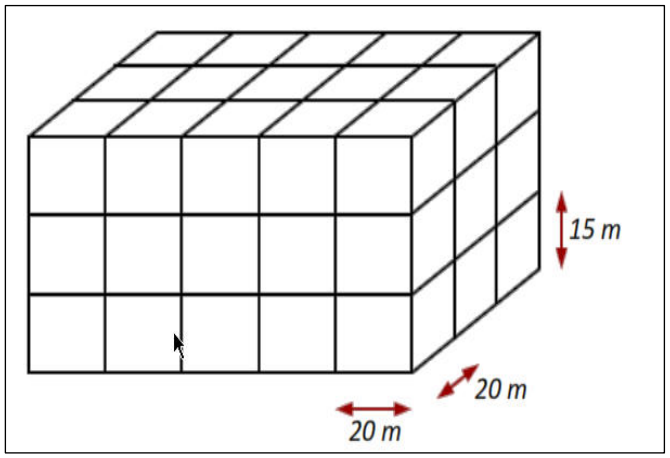
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1.1. Interpretación del modelo de bloques

El modelo de bloques utilizado en la unidad minera Cuajone tiene dimensiones de 20 x 20 x 15, las cuales están diseñadas de acuerdo con la dilución de la minería, los equipos de producción utilizados y la producción proyectada. Estas dimensiones del modelo de bloques en 3D son adecuados para adaptarse a las necesidades de la operación minera y garantizar una representación precisa del yacimiento:

Figura 24

Dimensión del modelo de bloques



Nota. Tomado de. "*Optimización del valor presente neto aplicando secuenciamiento de fases direccionadas en el diseño del pit del proyecto Cotabambas*" (p. 51), por Mendoza, 2021.

Se cuenta con un modelo de bloques cuyas leyes y recuperaciones han sido previamente estimadas por unidades estratigráficas. Además, se tienen las dimensiones del bloque y extensión del modelo en las coordenadas *X, Y* y *Z*. Las características del modelo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Características del modelo de bloques

Item	Unidades	
Altura de bloque	15	m
Ancho del bloque	20	m
Largo del bloque	20	m

Nota. Elaboración propia.

4.1.1.1. Zonas de mineralización

Las tres zonas por tipo de material tales como: la zona de sulfuros, óxidos y desmonte, quedan claramente diferenciados en la siguiente distribución de acuerdo a la codificación *MTYPE* en el modelo de bloques por ítem:

Tabla 5

Zonas de mineralización del modelo de bloques

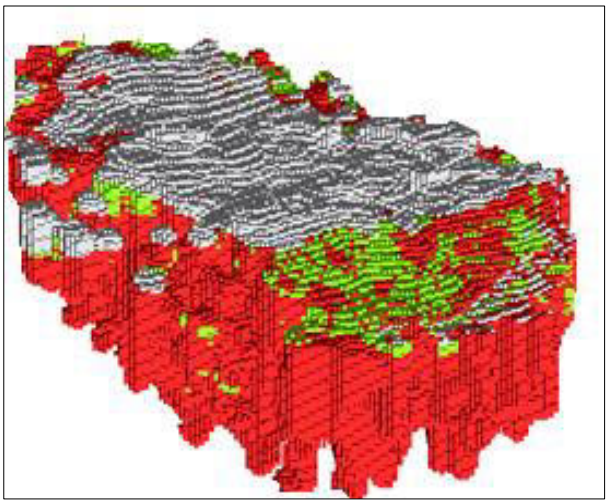
Variable	Item	Zona de Mineralización
MTYPE	1	Sulfuros
MTYPE	2	óxidos
MTYPE	3	Desmonte

Nota. Elaboración propia.

La Figura 25 muestra la distribución tridimensional del modelo de bloques según el tipo de material, ya sea mineralizado o no mineralizado.

Figura 25

Zonas de mineralización



Nota. Modelo de bloques distribuido por zonas de mineralización como sulfuros (rojo), óxidos (verde) y desmonte (gris). Elaboración propia.

El modelo de recursos se parametrizó como la variable *CATEG* en 2 categorías principales como son los recursos inferidos e indicados:

Tabla 6

Zonas de mineralización del modelo de bloques

Variable	Item	Recurso
CATEG	2	Indicado
CATEG	3	Inferido

Nota. Elaboración propia.

4.1.2. Parámetros técnico-económicos

Los parámetros económicos en la planificación minera son fundamentales y comprenden dos aspectos principales. En primer lugar, los precios de los metales, los cuales varían constantemente en el mercado internacional. Por lo tanto, al planificar un proyecto minero, es esencial realizar un análisis de los precios históricos para evaluar tendencias, ya que el precio actual puede no ser representativo. En segundo lugar, los costos asociados al proyecto futuro, los cuales deben recopilarse y ajustarse utilizando técnicas paramétricas para reflejar las

condiciones del mercado. Estos costos incluyen costos de exploración, minado, procesamiento y concentración, servicios generales, gastos administrativos, venta, transporte y refinación. (Delgado, 2009).

Estos parámetros económicos son críticos para derivar otros importantes aspectos del proyecto, como las leyes de corte, las reservas minerales potenciales y la inversión necesaria. Es esencial tener en cuenta estos elementos para garantizar una planificación minera efectiva y rentable. Para la evaluación del pit final se empleará los parámetros técnico-económicos de la unidad minera Cuajone, se utilizará la información pública del reporte técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary". Este enfoque proporciona una base sólida y contextualizada para la evaluación económica del pit final, alineada con la realidad operativa de la mina. En este proyecto, se considerarán los siguientes costos operativos y de procesamiento, así como los porcentajes de recuperación metalúrgica tanto para sulfuro como para óxido de cobre. En la Tabla 7, tenemos los parámetros técnico-económicos para la optimización del pit.

Tabla 7

Parámetros técnico-económicos

Parámetros	Valor	Unidad
Precio del Cobre	1.0 - 5.0	US$/lb
Costos de minado	2.337	US$/t
Sulfuros		
Costo de venta	-0.0024	US$/lb
Costo de procesamiento concentradora	7.971	US$/t
Costo de procesamiento fundición y refinería	0.382	US$/lb
Recuperación en fundición	97.426	%
Recuperación en refinería	99.855	%
Óxidos		
Costo de venta	-0.0090	US$/lb
Costo de Procesamiento SX/EW	9.061	US$/t
Recuperación SX/EW	100	%

Nota. Elaboración propia.

4.1.2.1. Cotización del Cobre

En este parámetro, se han considerado dos aspectos fundamentales que son pilares en la investigación. En primer lugar, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de los precios del cobre desde el año 2013 hasta el 2022. Esta recopilación se basó en datos obtenidos del "Anuario Minero 2022". La Tabla 8, que presenta estos datos, ofrece una perspectiva histórica y actualizada de la fluctuación de los precios del cobre a lo largo de los años. Este análisis detallado de los precios es crucial para realizar proyecciones y análisis económicos precisos en la industria minera.

Tabla 8

Registro del precio de cobre por año (US$/lb)

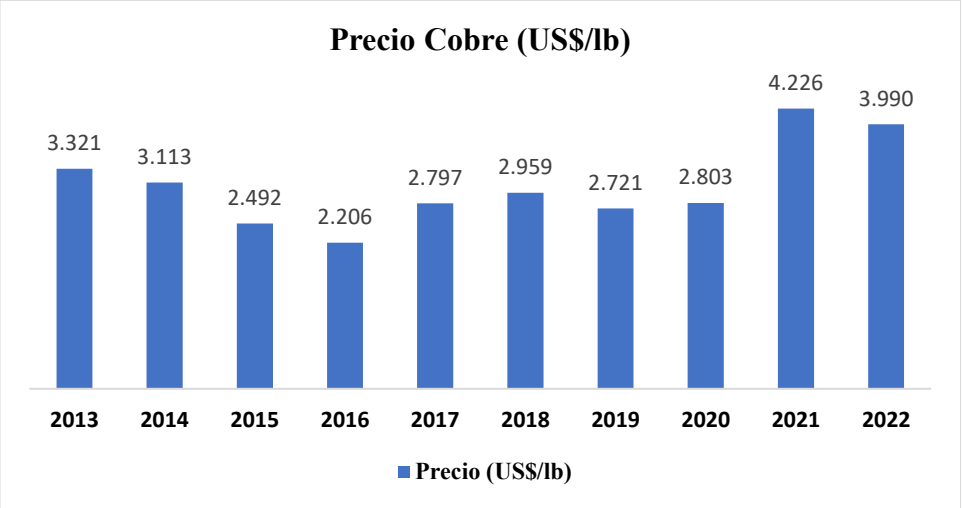
Mineral	Año	Precio (US$/lb)
Cobre (Cu)	2013	3.321
	2014	3.113
	2015	2.492
	2016	2.206
	2017	2.797
	2018	2.959
	2019	2.721
	2020	2.803
	2021	4.226
	2022	3.990
Promedio	**10 años**	**3.063**

Nota. Tomado de *"Anuario Minero 2022"* (p.54), por MINEM, 2022.

De acuerdo a la anterior lista, los precios del cobre han sufrido un alza desde 3.321 US$/lb hasta 3.990 US$/lb. Veamos esta variación ilustrada en el siguiente gráfico.

Figura 26

Histograma del precio de cobre por año (US$/lb)



Nota. Datos tomados de *"Anuario Minero 2022"*, por MINEM, 2022.

Con estos datos se ha efectuado un análisis de precios para obtener tres escenarios de los precios del cobre. Esto obedece a que en un proyecto minero no se puede utilizar los precios actuales para estimar las reservas económicas, sino más bien un precio promedio de los últimos 10 años antes del inicio de la operación del proyecto.

Estos datos muestran un promedio de 3.063 US$/lb, con una variabilidad moderada representada por una desviación estándar de 0.633. El coeficiente de variación del 20.674% indica una dispersión relativa moderada en comparación con el promedio.

a) Precio del Cobre para la optimización

El precio del metal utilizado para la optimización de pit es un factor clave en la planificación y evaluación económica de proyectos mineros.

Para la optimización del pit de la mina Cerro Verde, se utiliza un precio del cobre de 2.50 US$/lb. Este precio se emplea para las proyecciones a largo plazo en la estimación de reservas y se considera adecuado para respaldar el análisis financiero de la evaluación de las reservas minerales (Freeport McMoRan, 2021).

En el “Integrated Annual Report” de Anglo American se menciona que el precio promedio del cobre en la London Metal Exchange aumentó en un 51% debido a una fuerte recuperación de la actividad económica después de las primeras olas del brote de Covid-19 en 2020, y que el precio alcanzó un máximo histórico de 4,86 US$/lb en mayo de 2021. Este tipo de información sobre el precio del mercado puede influir en las decisiones de optimización de la mina (Anglo American, 2021).

Bajo esta premisa, se establece un rango de precios del cobre para la optimización de pit entre 1.0 US$/lb y 5.0 US$/lb, para la evaluación económica utilizando los parámetros técnico económicos de la unidad minera Cuajone. A través de los parámetros necesarios para la optimización del pit, el software determinará el precio del cobre que maximizará los beneficios económicos. Este enfoque también permite analizar posibles acciones a tomar en caso de una caída repentina en el precio del metal.

4.1.2.2. Costo de minado

El costo minero base utilizado fue de 1,763 US$/t, calculado a partir de la estimación del costo minero de vida útil de las reservas minerales a finales de 2021, junto con los costos incrementales de transporte. Además, el costo de mantenimiento de la minería fue de 0,574 US$/t, e incluyó los costos de capital de los equipos de minería y el mantenimiento de la minería. Estos costos son fundamentales en la evaluación económica de un proyecto minero, ya que influyen directamente en la rentabilidad y viabilidad a largo plazo del mismo (Wood Group, 2022). El costo total de minado asciende a 2,337 US$/t, como se muestra en la Tabla 7.

4.1.2.3. Costo de procesamiento

Los costos de procesamiento se calcularon utilizando un promedio de costos reales ajustados para tener en cuenta las variaciones esperadas de los costos de las principales materias primas, como energía, consumibles y servicios. Se estima un costo de procesamiento de 7,971 US$/t para los sulfuros en la concentradora, y un costo de procesamiento en la fundición y refinería de 0,382 US$/lb.

El costo de procesamiento de los óxidos en el SX/EW es de 9,061 US$/t de acuerdo al “Cuajone Operations Peru Technical Report Summary” (Wood Group, 2022). Estos datos se encuentran detallados en la Tabla 7.

4.1.2.4. Costo de venta

El costo de venta del cobre en minería se refiere al costo total asociado específicamente con la comercialización del cobre producido por una mina. Esto incluye los costos relacionados con el transporte del concentrado de cobre o del cobre refinado desde la mina hasta el mercado o los clientes finales, así como los costos administrativos y financieros asociados con la venta y distribución del producto. Estos costos pueden variar según la ubicación de la mina, los precios de los insumos y otros factores.

Para la optimización de pit en el caso de los sulfuros, se considerará un costo de venta de -0.0024 US$/lb, y para los óxidos, -0.0090 US$/lb, como se indica en la Tabla 7. Estos valores son esenciales para calcular con precisión la rentabilidad y viabilidad económica del proyecto minero. Los datos se obtuvieron del informe técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary" (Wood Group, 2022), lo que garantiza su fiabilidad y relevancia para la evaluación económica del proyecto.

4.1.2.5. Recuperación metalúrgica

Para la optimización del pit en la unidad minera Cuajone según el reporte técnico “Cuajone Operations Peru Technical Report Summary”, se está utilizando un porcentaje de recuperación estimado promedio de 84.4 % para el cobre. Estos valores de recuperación se basan en pruebas metalúrgicas y procedimientos analíticos adecuados para el tipo de mineralización y son representativos de los estilos de mineralización que se encuentran en el depósito que se explotará mediante métodos de minería a cielo abierto (Wood Group, 2022).

En cuanto a la recuperación, en fundición es del 97.426% y en refinería es del 99.855% para los sulfuros. Por otro lado, en el proceso SX/EW se redondeará a una recuperación del 100% para los óxidos.

4.1.2.6. Capacidad de Planta

La capacidad de la planta en minería es la máxima cantidad de material que la planta de procesamiento puede manejar en un período determinado. Este aspecto es crucial en la planificación minera y la optimización de la producción, ya que una capacidad inadecuada puede resultar en cuellos de botella o costos innecesarios.

Para determinar la capacidad de planta, consideramos factores como el tamaño y la capacidad de los equipos, la eficiencia de los procesos, la disponibilidad de recursos como energía y agua, y la logística de transporte. Revisamos y ajustamos periódicamente la capacidad de planta para adaptarnos a las condiciones cambiantes del mercado y de la mina. Para la realización de la optimización de este proyecto se tomará en cuenta una capacidad de planta de 25 Mt/a.

4.1.2.7. Factor de conversión

El factor de conversión utilizado para cambiar una unidad de medida de un mineral o metal a otra unidad de medida será de 21.8257 el cual multiplicará a la Ecuación 1 para obtener el valor económico del bloque.

4.1.2.8. Zonas geotécnicas

En la Tabla 9 se muestra el parámetro geomecánico utilizado para la delimitación del pit final.

Tabla 9

Parámetro geomecánico

	Ángulo
Angulo de talud global - OSA	45°

Nota. Elaboración propia.

4.1.3. Resultado de pits shells

Se realizó varias simulaciones de pit final, explorando diversas variaciones en el precio del cobre. Mediante el empleo del algoritmo matemático de flujo máximo Pseudoflow, se ha logrado generar un total de 41 escenarios distintos, cada uno caracterizado por una variación lineal en el factor de ingresos, con intervalos de 0.1 US$/lb, en un amplio rango que abarca desde 1.0 US$/lb hasta 5.0 US$/lb La Tabla 10 exhibe de forma detallada los resultados obtenidos en estas simulaciones a través del método de flujo máximo Pseudoflow. Cada escenario presenta información crucial, como el precio del cobre, el VAN expresado en MUS$ tanto en el caso óptimo como en el peor escenario, la cantidad de mineral y desmonte en toneladas, la ley promedio de mineral de cobre en porcentaje, y la relación estéril-mineral.

Tabla 10

Resultados de optimización utilizando flujo máximo Pseudoflow.

Pit Shell	Precio del Cu	Best Case (MUS$)	Worst Case (MUS$)	Total Minado (Mt)	Mineral (Mt)	TCU (%)	Desmonte (Mt)	REM
1	US$1.0	3,926.011	3,926.011	171.878	106.810	1.169	65.068	0.609
2	US$1.1	6,418.149	6,108.518	373.206	246.658	1.030	126.548	0.513
3	US$1.2	7,421.600	6,820.453	525.477	355.425	0.958	170.052	0.478
4	US$1.3	8,038.925	6,966.348	716.242	483.787	0.891	232.455	0.480
5	US$1.4	8,606.691	6,434.389	1,255.001	795.316	0.808	459.685	0.578
6	US$1.5	8,732.356	5,809.504	1,687.960	1,060.760	0.754	627.200	0.591
7	US$1.6	8,768.246	5,302.055	2,075.265	1,287.211	0.717	788.054	0.612
8	US$1.7	8,782.453	4,399.516	3,036.483	1,836.307	0.653	1,200.176	0.654
9	US$1.8	8,783.877	4,121.468	3,465.581	2,090.811	0.630	1,374.770	0.658
10	US$1.9	8,784.339	3,890.315	3,894.991	2,341.119	0.609	1,553.872	0.664
11	US$2.0	8,784.488	3,697.145	4,297.629	2,557.169	0.594	1,740.460	0.681
12	US$2.1	8,784.541	3,517.738	4,656.995	2,733.232	0.582	1,923.763	0.704
13	US$2.2	8,784.562	3,363.492	4,987.209	2,878.300	0.574	2,108.909	0.733
14	US$2.3	8,784.573	3,140.836	5,363.801	3,023.999	0.566	2,339.801	0.774
15	US$2.4	8,784.576	3,022.714	5,584.486	3,109.085	0.561	2,475.400	0.796
16	US$2.5	8,784.580	2,803.779	5,976.735	3,238.120	0.555	2,738.615	0.846
17	US$2.6	8,784.581	2,676.796	6,207.860	3,318.872	0.550	2,888.989	0.870
18	US$2.7	8,784.582	2,528.233	6,491.749	3,409.968	0.546	3,081.781	0.904
19	US$2.8	8,784.582	2,405.644	6,725.059	3,480.240	0.542	3,244.820	0.932
20	US$2.9	8,784.582	2,292.357	6,918.140	3,535.533	0.539	3,382.606	0.957

Pit Shell	Precio del Cu	Best Case (MUS$)	Worst Case (MUS$)	Total Minado (Mt)	Mineral (Mt)	TCU (%)	Desmonte (Mt)	REM
21	US$3.0	8,784.582	2,207.573	7,088.488	3,584.375	0.537	3,504.112	0.978
22	US$3.1	8,784.582	2,126.438	7,254.390	3,633.238	0.534	3,621.152	0.997
23	US$3.2	8,784.582	2,038.503	7,395.571	3,664.371	0.533	3,731.200	1.018
24	US$3.3	8,784.582	1,975.254	7,535.234	3,702.338	0.531	3,832.896	1.035
25	US$3.4	8,784.582	1,888.582	7,680.183	3,731.952	0.529	3,948.231	1.058
26	US$3.5	8,784.582	1,828.011	7,796.335	3,760.994	0.528	4,035.341	1.073
27	US$3.6	8,784.582	1,739.781	7,930.761	3,788.450	0.526	4,142.311	1.093
28	US$3.7	8,784.582	1,710.995	8,002.892	3,803.771	0.525	4,199.121	1.104
29	US$3.8	8,784.582	1,601.840	8,188.183	3,837.566	0.524	4,350.617	1.134
30	US$3.9	8,784.582	1,580.049	8,248.614	3,849.521	0.523	4,399.092	1.143
31	US$4.0	8,784.582	1,528.828	8,316.905	3,861.952	0.523	4,454.952	1.154
32	US$4.1	8,784.582	1,477.483	8,418.208	3,879.864	0.522	4,538.344	1.170
33	US$4.2	8,784.582	1,435.211	8,497.395	3,891.744	0.521	4,605.651	1.183
34	US$4.3	8,784.582	1,401.541	8,556.933	3,903.431	0.520	4,653.502	1.192
35	US$4.4	8,784.582	1,349.707	8,628.348	3,914.373	0.520	4,713.975	1.204
36	US$4.5	8,784.582	1,319.379	8,682.870	3,922.763	0.519	4,760.107	1.213
37	US$4.6	8,784.582	1,272.328	8,788.953	3,938.379	0.519	4,850.574	1.232
38	US$4.7	8,784.582	1,208.304	8,888.354	3,952.519	0.518	4,935.834	1.249
39	US$4.8	8,784.582	1,190.768	8,911.942	3,956.077	0.518	4,955.866	1.253
40	US$4.9	8,784.582	1,169.414	8,952.980	3,962.659	0.517	4,990.322	1.259
41	US$5.0	8,784.582	1,138.791	9,020.072	3,970.514	0.517	5,049.558	1.272

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 11 exhibe de forma detallada los resultados obtenidos en estas simulaciones a través del método de Lerch & Grossman.

Tabla 11

Resultados de optimización utilizando Lerch & Grossman.

Pit Shell	Precio del Cu	Best Case (MUS$)	Worst Case (MUS$)	Total Minado (Mt)	Mineral (Mt)	TCU (%)	Desmonte (Mt)	REM
1	US$1.0	3,740.818	3,740.818	165.950	100.982	1.169	64.968	0.643
2	US$1.1	6,418.038	6,108.506	373.257	246.658	1.030	126.599	0.513
3	US$1.2	7,421.489	6,820.442	525.527	355.425	0.958	170.102	0.479
4	US$1.3	8,038.813	6,966.335	716.293	483.787	0.891	232.506	0.481
5	US$1.4	8,606.578	6,434.371	1,255.056	795.316	0.808	459.740	0.578
6	US$1.5	8,732.244	5,809.373	1,688.045	1,060.792	0.754	627.253	0.591
7	US$1.6	8,768.130	5,302.041	2,075.318	1,287.211	0.717	788.107	0.612
8	US$1.7	8,782.337	4,399.492	3,036.540	1,836.307	0.653	1,200.233	0.654

Pit Shell	Precio del Cu	Best Case (MUS$)	Worst Case (MUS$)	Total Minado (Mt)	Mineral (Mt)	TCU (%)	Desmonte (Mt)	REM
9	US$1.8	8,783.762	4,121.452	3,465.634	2,090.811	0.630	1,374.824	0.658
10	US$1.9	8,784.223	3,890.299	3,895.045	2,341.119	0.609	1,553.926	0.664
11	US$2.0	8,784.373	3,697.126	4,297.684	2,557.169	0.594	1,740.515	0.681
12	US$2.1	8,784.425	3,517.721	4,657.049	2,733.232	0.582	1,923.817	0.704
13	US$2.2	8,784.446	3,363.478	4,987.263	2,878.300	0.574	2,108.963	0.733
14	US$2.3	8,784.457	3,140.821	5,363.854	3,023.999	0.566	2,339.855	0.774
15	US$2.4	8,784.461	3,022.697	5,584.540	3,109.085	0.561	2,475.455	0.796
16	US$2.5	8,784.464	2,803.761	5,976.790	3,238.120	0.555	2,738.670	0.846
17	US$2.6	8,784.465	2,676.783	6,207.912	3,318.872	0.550	2,889.040	0.870
18	US$2.7	8,784.466	2,528.212	6,491.804	3,409.968	0.546	3,081.836	0.904
19	US$2.8	8,784.466	2,405.621	6,725.115	3,480.240	0.542	3,244.875	0.932
20	US$2.9	8,784.466	2,292.335	6,918.196	3,535.533	0.539	3,382.663	0.957
21	US$3.0	8,784.466	2,207.556	7,088.542	3,584.375	0.537	3,504.167	0.978
22	US$3.1	8,784.466	2,126.416	7,254.447	3,633.238	0.534	3,621.209	0.997
23	US$3.2	8,784.466	2,038.485	7,395.626	3,664.371	0.533	3,731.254	1.018
24	US$3.3	8,784.466	1,975.235	7,535.289	3,702.338	0.531	3,832.951	1.035
25	US$3.4	8,784.466	1,888.562	7,680.239	3,731.952	0.529	3,948.287	1.058
26	US$3.5	8,784.466	1,827.985	7,796.394	3,760.994	0.528	4,035.400	1.073
27	US$3.6	8,784.466	1,739.761	7,930.817	3,788.450	0.526	4,142.366	1.093
28	US$3.7	8,784.466	1,710.975	8,002.948	3,803.771	0.525	4,199.177	1.104
29	US$3.8	8,784.466	1,601.810	8,188.244	3,837.566	0.524	4,350.678	1.134
30	US$3.9	8,784.466	1,580.020	8,248.672	3,849.522	0.523	4,399.151	1.143
31	US$4.0	8,784.466	1,528.801	8,316.964	3,861.952	0.523	4,455.012	1.154
32	US$4.1	8,784.466	1,477.455	8,418.268	3,879.864	0.522	4,538.404	1.170
33	US$4.2	8,784.466	1,435.193	8,497.451	3,891.744	0.521	4,605.706	1.183
34	US$4.3	8,784.466	1,401.511	8,556.993	3,903.431	0.520	4,653.563	1.192
35	US$4.4	8,784.466	1,349.682	8,628.405	3,914.374	0.520	4,714.031	1.204
36	US$4.5	8,784.466	1,319.352	8,682.927	3,922.763	0.519	4,760.164	1.213
37	US$4.6	8,784.466	1,272.295	8,789.010	3,938.379	0.519	4,850.631	1.232
38	US$4.7	8,784.466	1,208.279	8,888.413	3,952.519	0.518	4,935.893	1.249
39	US$4.8	8,784.466	1,190.754	8,911.996	3,956.077	0.518	4,955.919	1.253
40	US$4.9	8,784.466	1,169.391	8,953.038	3,962.659	0.517	4,990.379	1.259
41	US$5.0	8,784.466	1,138.774	9,020.127	3,970.514	0.517	5,049.613	1.272

Nota. Elaboración propia.

4.1.4. Eficiencia de los algoritmos de optimización.

De acuerdo a los resultados y pit shells generados, comparando los métodos de optimización a través de la herramienta Project Evaluator del software HxGN MinePlan 15.8. utilizando los métodos de optimización de pit como son Lerch & Grossman y el flujo máximo Pseudoflow revisamos la Tabla 12 con los datos obtenidos para los 41 pit shells generados por cada algoritmo de optimización. De los cuales se inició el proceso de ejecución a una determinada hora para realizar el registro.

Tabla 12

Eficiencia de optimización

Algoritmos de optimización	Tiempo de optimización
Flujo máximo Pseudoflow	01:51 Hrs.
Lerch & Grossman	02:31 Hrs.

Nota. Elaboración propia.

Revisando la Tabla 13, se observa una diferencia porcentual en los tiempos de optimización de cada uno de los algoritmos utilizados para generar los pit shells. Los tiempos de optimización obtenidos con el método Pseudoflow son menores que los obtenidos con el método Lerch & Grossman. Esto sugiere una mayor eficiencia del método Pseudoflow, debido a que proporciona los pit shells generados con un ligero aumento en el VAN y una mayor eficiencia en tiempos de optimización.

El método Pseudoflow destaca por su capacidad para crear rápidamente múltiples escenarios económicos al modificar las variables técnico-económicas. Esta capacidad es especialmente útil en momentos críticos, como cambios en los precios del cobre.

La diferencia de tiempo de optimización de pit shells de 39 minutos y 58 segundos entre el método Pseudoflow y el método Lerch & Grossman destaca la eficacia del primero en términos de tiempo y precisión en la generación de pit shells.

Tabla 13

Diferencia porcentual

Algoritmos de optimización	Tiempo de optimización	Diferencia Horaria	Diferencia porcentual
Flujo máximo Pseudoflow	01:51 Hrs	00:39 Hrs	26.59 %
Lerch & Grossman	02:31 Hrs		

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 14 se muestra el tiempo de optimización para cada pit utilizando dos algoritmos de optimización diferentes: el método de flujo máximo Pseudoflow y el algoritmo de Lerch & Grossman. Estos tiempos de optimización se han recopilado y comparado para demostrar la eficiencia relativa de cada algoritmo en la delimitación de los pits. Los resultados proporcionan una visión valiosa sobre qué método puede ser más adecuado para optimizar la planificación minera en función del tiempo requerido para alcanzar resultados óptimos.

Tabla 14

Tiempo de optimización por algoritmo de optimización

N° Pit	Lerch and Grossman	Pseudoflow	Diferencia de tiempos	Diferencia porcentual
1	00m 17s	00m 11s	00m 06s	35.29%
2	00m 22s	00m 16s	00m 06s	27.27%
3	00m 24s	00m 21s	00m 03s	12.50%
4	00m 41s	00m 29s	00m 12s	29.27%
5	00m 50s	00m 40s	00m 10s	20.00%
6	01m 03s	00m 54s	00m 09s	14.29%
7	01m 56s	01m 06s	00m 50s	43.10%
8	02m 10s	01m 21s	00m 49s	37.69%
9	02m 15s	01m 39s	00m 36s	26.67%
10	02m 11s	01m 56s	00m 15s	11.45%
11	02m 16s	02m 08s	00m 08s	5.88%
12	02m 16s	02m 19s	00m 03s	2.21%
13	02m 44s	02m 29s	00m 15s	9.15%

N° Pit	Lerch and Grossman	Pseudoflow	Diferencia de tiempos	Diferencia porcentual
14	03m 05s	02m 38s	00m 27s	14.59%
15	03m 25s	02m 43s	00m 42s	20.49%
16	03m 45s	02m 49s	00m 56s	24.89%
17	03m 55s	03m 06s	00m 49s	20.85%
18	04m 18s	03m 02s	01m 16s	29.46%
19	04m 27s	03m 03s	01m 24s	31.46%
20	04m 09s	02m 58s	01m 11s	28.51%
21	04m 10s	02m 59s	01m 11s	28.40%
22	04m 19s	03m 11s	01m 08s	26.25%
23	04m 16s	03m 15s	01m 01s	23.83%
24	04m 29s	03m 13s	01m 16s	28.25%
25	04m 41s	03m 09s	01m 32s	32.74%
26	04m 27s	03m 09s	01m 18s	29.21%
27	04m 44s	03m 13s	01m 31s	32.04%
28	04m 36s	03m 29s	01m 07s	24.28%
29	04m 48s	03m 27s	01m 21s	28.13%
30	04m 47s	03m 29s	01m 18s	27.18%
31	04m 53s	03m 35s	01m 18s	26.62%
32	05m 09s	03m 30s	01m 39s	32.04%
33	05m 01s	03m 41s	01m 20s	26.58%
34	04m 58s	03m 38s	01m 20s	26.85%
35	05m 02s	03m 44s	01m 18s	25.83%
36	05m 28s	03m 33s	01m 55s	35.06%
37	05m 30s	03m 34s	01m 56s	35.15%
38	05m 33s	03m 33s	02m 00s	36.04%
39	05m 13s	03m 37s	01m 36s	30.67%
40	05m 07s	03m 48s	01m 19s	25.73%
41	05m 17s	03m 50s	01m 27s	27.44%

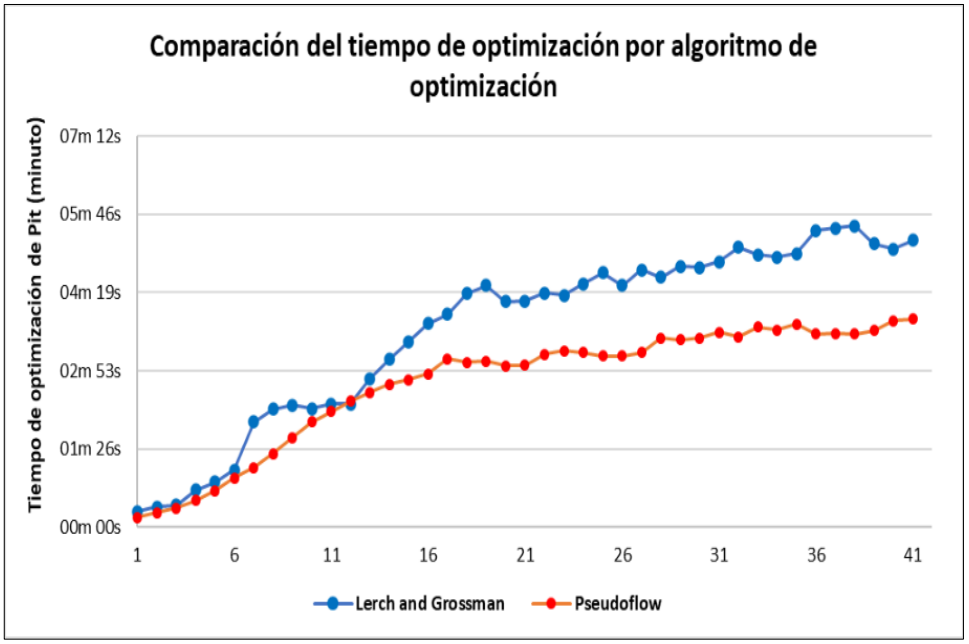
Nota. Elaboración propia.

En la Figura 27 se presenta una comparación gráfica de los tiempos de optimización obtenidos mediante los algoritmos. El objetivo de este análisis es determinar cuál de los dos algoritmos es más eficiente en la delimitación de los pits.

A medida que aumenta el número de bloques a extraer, es de esperar que el tiempo de optimización también aumente, ya que se requiere más tiempo para evaluar todas las posibles configuraciones del pit. Sin embargo, se espera que el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow demuestre una mayor eficiencia en términos de tiempo en comparación con el algoritmo de Lerch & Grossman, debido a su capacidad para relajar las restricciones de equilibrio de flujo y su versatilidad en la delimitación de pits.

Figura 27

Comparación del tiempo de optimización por algoritmo

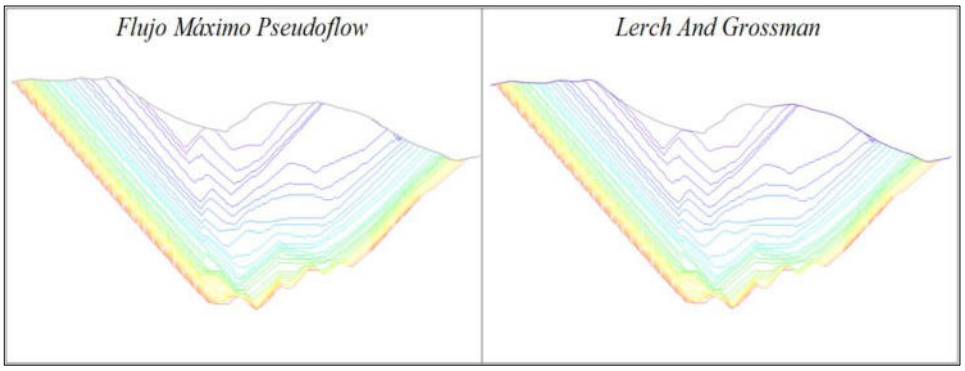


Nota. Elaboración propia.

Al observar la Figura 28, podemos visualizar las secciones transversales de los distintos pit shells generados por ambos métodos de optimización. Se destaca que uno de los métodos muestra una mayor eficiencia en la generación de estos pit shells.

Figura 28

Sección de Pit shells generados



Nota. Pit shells generados por ambos algoritmos de optimización. Elaboración propia.

4.1.5. Determinación del pit final óptimo de la mina a tajo abierto.

Al evaluar la eficiencia de optimización de pit de cada método, se ha decidido seleccionar el pit final a partir de los pit shells generados por el algoritmo de optimización de flujo máximo Pseudoflow. Este método mostró un ligero aumento en el VAN en comparación con el otro método evaluado, además de ofrecer una mayor eficiencia en términos de tiempo de optimización.

La razón por la cual el VAN aumentó ligeramente con el algoritmo de optimización de flujo máximo Pseudoflow se debe a su capacidad para explorar y encontrar soluciones más eficientes en el diseño del pit. El algoritmo Pseudoflow destaca por su capacidad para crear múltiples escenarios económicos rápidamente al modificar las variables técnico-económicas, lo que le permite determinar el pit shell de forma mas eficiente. Además, al ser más eficiente, puede explorar un mayor número de opciones en menos tiempo, lo que aumenta las probabilidades de encontrar soluciones con un VAN más alto.

En la Figura 29, se presentan los resultados obtenidos por el software HxGN MinePlan utilizando el método de optimización de flujo máximo Pseudoflow.

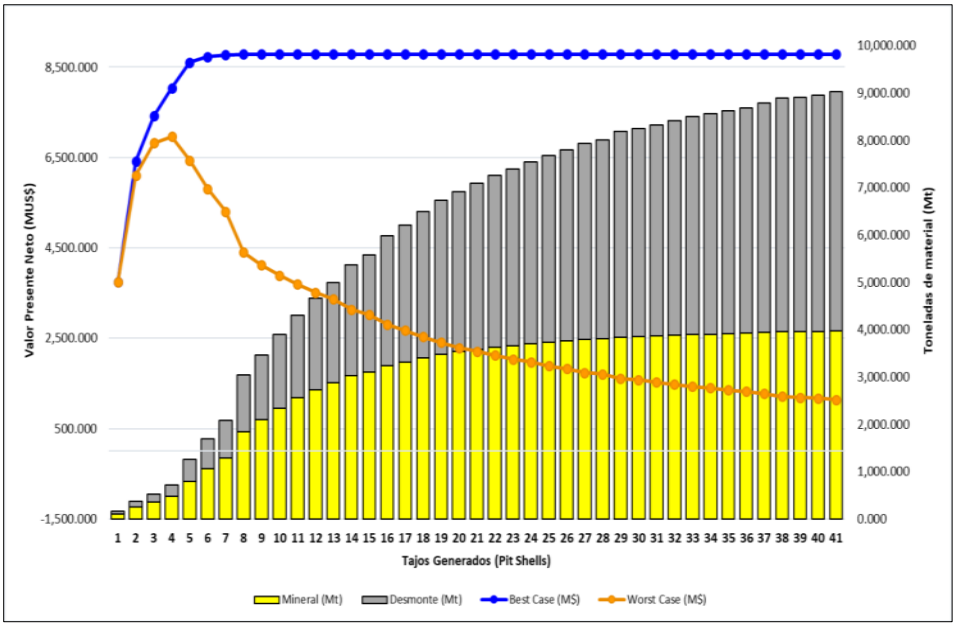
La selección del pit final dependerá del criterio que el planificador utilice; no obstante, se sugiere ubicarlo en la parte de la curva donde se obtenga el Worst Case más alto y se alcance el Best Case más elevado. Esto permitirá situarse en un rango de menor variabilidad del VAN del plan minero. (Castillo, 2009).

Según el criterio de selección de pit final mencionado anteriormente, en la Figura 29 se observa un rango de selección que destaca el pit 4, con el mayor VAN en el Worst Case, alcanzando los 8,038.925 MUS$ con un precio de cobre de 1.3 US$/lb, y el pit 41, con el mayor VAN en el Best Case, llegando a los 8,784.582 MUS$ con un precio de cobre de 5.0 US$/lb.

Por otro lado, según la Tabla 8 del registro de precios del cobre por año, se observa un incremento en el precio del cobre desde 3.321 US$/lb hasta 3.990 US$/lb en el periodo de 2013 al año 2022.

Figura 29

Gráfico Pit by Pit



Nota. Elaboración propia.

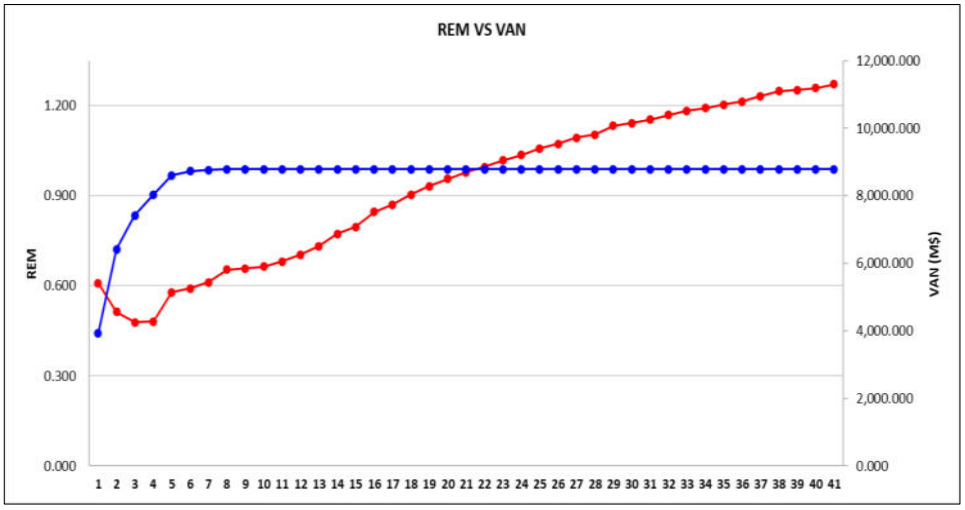
Asimismo, para mejorar la evaluación del pit, es necesario crear una gráfica que muestre la relación REM frente al VAN, con el objetivo de identificar los pits que tienen una menor REM y un mayor VAN. La Figura

30 ilustra que los Pit Shells generados entre el Pit Shell 1 al 41 con un precio entre 1.0 US$/lb y 5.0 US$/lb muestran que a medida que el VAN aumenta, la REM tiende a incrementar también.

Por otro lado, al analizar el gráfico con más detalle, se observa que a partir del Pit Shell N°18, el VAN alcanza un punto de estabilidad relativa, donde deja de aumentar de forma considerable a pesar de que la REM continúe aumentando.

Figura 30

Gráfico REM vs VAN



Nota. Elaboración propia.

4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según los resultados y los parámetros necesarios para el caso de estudio, que incluyen la variación del precio del cobre a lo largo del tiempo, los costos operativos, los límites geotécnicos y los criterios de diseño, se seleccionó un precio conservador del cobre de 3.3 US$/lb para el pit final óptimo seleccionado N°24. Esta elección se basa en la comparación con el precio registrado en el año 2022 de 3.99 US$/lb, lo que lo hace conservador y proporciona una cobertura contra la posible disminución del precio del metal en el mercado internacional en situaciones adversas.

En cuanto a los resultados obtenidos, se observa que el uso del algoritmo Pseudoflow tuvo un impacto significativo en el cálculo del pit final. El pit generado

por este método tuvo un VAN de 8,784.582 MUS$, mientras que el generado por el método Lerchs & Grossman fue de 8,784.466 MUS$, representando una diferencia de 0.116 MUS$. Además, al generar los 41 pit shells por cada método de optimización sin modificar los parámetros técnico-económicos y utilizando la misma herramienta computacional, se notó una diferencia de 39 minutos y 58 segundos en el tiempo de optimización entre el método Pseudoflow y el método Lerchs & Grossman. Estos resultados destacan la eficacia del método Pseudoflow en términos de tiempo y precisión en la generación de pit shells.

Es importante mencionar que el VAN se ve reflejado en la comparación de diferentes escenarios económicos, mostrando las variaciones en la rentabilidad del proyecto. Se utilizó el revenue factor lineal para tener diversos escenarios económicos, lo que permitió determinar el pit N° 24 con un VAN de 8,784.582 MUS$ en el precio de 3.3 US$/lb, un REM de 1.035 y una ley de Cobre promedio del 0.531 %.

Estos resultados son consistentes con la literatura revisada. Musenge & Chanda (2022) destacan la eficiencia del algoritmo de Ford y Fulkerson, similar al Pseudoflow, en la determinación del límite final del tajo en un tiempo más corto que el algoritmo de Lerchs & Grossman. Avalos & Ortiz (2020) resaltan la importancia del método de flujo máximo Pseudoflow en la minería a cielo abierto al determinar la máxima cantidad de material extraíble para maximizar el valor neto de los bloques. Poniewierski (2018) también destaca la eficiencia del algoritmo Pseudoflow en comparación con Lerchs & Grossman, lo que se refleja en los resultados obtenidos en este estudio. Xiaoyu et al. (2017) también respaldan esta idea al demostrar que el Pseudoflow implementado en GEOVIA Whittle ofrece una optimización más rápida que el algoritmo tradicional de Lerchs & Grossmann.

4.2.1. Prueba de hipótesis

Para realizar la prueba de hipótesis, se tomó los valores de las variables que viene a ser el tiempo de optimización por cada pit shells generado de acuerdo a los datos de la Tabla 14 empleando los algoritmos de optimización flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman.

Para verificar las hipótesis planteadas de la presente investigación, primero se debe determinar si son paramétricas o no paramétricas los datos de la variable dependiente eficiencia de optimización de pit shells, para lo cual se aplicó la Prueba de Shapiro-Wilk utilizando el software SPSS.

4.2.1.1. Prueba de normalidad

$\mathbf{H_0}$: Las muestras de las variables cumplen con el supuesto de normalidad en la distribución de los datos.

$\mathbf{H_1}$: Las muestras de las variables no cumplen con el supuesto de normalidad en la distribución de los datos.

Para demostrar que los valores de las variables siguen un supuesto de distribución normal o no cumple con el supuesto de distribución normal; existen dos tipos de pruebas estadísticas:

- Kolmogorov-Smirnov (cuando la muestra es >50)
- Shapiro Wilk (cuando la muestra es < 50)

Para este trabajo, se aplicará Shapiro wilk, puesto que la muestra es de 41 casos registrados por cada algoritmo de optimización.

Nivel de significancia:

p-valor=0.05; α=0.05 (5% de error)

Donde:

p-valor: margen de error

α: nivel de significación

Regla de decisión:

Si los resultados estadísticos nos muestran un p-valor calculado menor o igual que el error establecido (p-valor=0.05) se acepta la hipótesis alterna y no se acepta la nula.

Tabla 15

Prueba de normalidad

	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	**gl**	**Sig.**
Pseudoflow	,831	41	,000
Lerch & Grossman	,871	41	,000

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con la Tabla 15. Debido a que el nivel de significancia es menor al p-valor la regla de decisión indica que obedece a un comportamiento no paramétrico. Teniendo los resultados de la prueba de normalidad, y con el fin de contrastar la hipótesis especifica se procede a realizar la prueba estadística W de Wilcoxon.

Decisiones por las que se seleccionó la prueba de Wilcoxon:

- Es un problema de Comparación.
- Variable Independiente: Algoritmo de optimización a utilizar.
- 2 grupos relacionados (eficiencia de optimización de pit shells con el algoritmo Lerch & Grossman y posterior eficiencia de optimización de pit shells con el algoritmo flujo máximo Pseudoflow).
- Variable Dependiente: productividad.
- H_0: La propuesta de optimización de tiempo no mejora la productividad en el área de servicios de una empresa de mantenimiento mecánico.
- Prueba estadística: Prueba de Wilcoxon.
- Regla de decisión: Si p-valor ≤ 0.05 se rechaza Ho.

4.2.1.2. Prueba de Hipótesis general

H_0: La propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow no permitirá determinar el límite del pit final de forma más eficiente ante el algoritmo Lerch & Grossman.

$\mathbf{H_1}$: La propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permitirá determinar el límite del pit final de forma más eficiente ante el algoritmo Lerch & Grossman.

Para la verificación de la Hipótesis General se aplicará la prueba de Wilcoxon mediante el software SPSS, los resultados muestran la Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 16

Rango de Wilcoxon

		N	Rango promedio	Suma de rangos
Pseudoflow – Lerch & Grossman	Rangos negativos	40[a]	21,49	859,50
	Rangos positivos	1[b]	1,50	1,50
	Empates	0[c]		
	Total	41		

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17

Nivel de significancia

	Pseudoflow – Lerch & Grossman
Z	-5,560[b]
Sig. asintótica(bilateral)	,000
a. Prueba de rangos con signo de Wilcoxon	
b. Se basa en rangos positivos.	

Nota. Elaboración propia.

Toma de decisión:

En la Tabla 17, aplicando la prueba de Wilcoxon se observa un nivel de significancia de 0.000, menor a 0.05, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que el algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permitirá determinar el límite del pit final de forma más eficiente ante el algoritmo Lerch & Grossman.

4.2.1.3. Hipótesis específica

De acuerdo a los resultados obtenido podemos determinar las hipótesis específicas de investigación.

a) Prueba de primera hipótesis especifica

$\mathbf{H_0}$: El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor o igual que el algoritmo Lerch & Grossman.

$\mathbf{H_1}$: El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor que el algoritmo Lerch & Grossman.

De acuerdo al pit final seleccionado N°24 con un precio de cobre de 3.30 US$/lb tenemos el tiempo de optimización que indica un registro de 03 minutos y 13 segundos para el algoritmo Pseudoflow y para el caso de Lerch & Grossman registra un tiempo de 04 minutos y 29 segundos como se observa en la Tabla 14. De la misma forma a través de la Figura 27 se tiene el grafico comparativo de tiempos de optimización por cada pit shells generado.

b) Prueba de segunda hipótesis especifica

$\mathbf{H_0}$: El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor o igual al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.

$\mathbf{H_1}$: El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.

De acuerdo al pit final seleccionado N°24, con un precio de cobre de 3.30 US$/lb, tenemos un VAN de 8,784.582 MUS$ para el algoritmo flujo máximo Pseudoflow, de acuerdo a la Tabla 10, y para el caso del algoritmo Lerch & Grossman registra un VAN de 8,784.466 MUS$, como se puede ver en la Tabla 11, obteniendo una diferencia de 0.116 MU$, aceptando de esta manera la hipótesis de investigación.

Por otra parte, el algoritmo Pseudoflow, si bien es cierto presenta un mayor VAN en el pit final seleccionado, este no representa una diferencia considerable entre ambos resultados de acuerdo a la escala de resultados obtenidos.

V. CONCLUSIONES

En esta investigación, se evaluó de manera efectiva si el uso del algoritmo de optimización de flujo máximo Pseudoflow permite determinar el límite del pit final de forma más eficiente que el algoritmo Lerch & Grossman. Los resultados obtenidos, respaldados por la prueba estadística de Wilcoxon con un nivel de significancia de 0.000, confirman que el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow supera al algoritmo Lerch & Grossman en términos de eficiencia en la determinación del límite del pit final. Se encontró una diferencia significativa de 39 minutos y 58 segundos en cuanto al tiempo para la generación de los pit shells.

Se identificaron y utilizaron adecuadamente los parámetros necesarios para la delimitación de los pit shells, tomando como base los parámetros técnico-económicos del reporte técnico "Cuajone Operations Peru Technical Report Summary" de la unidad minera Cuajone. Estos parámetros fueron empleados en la ejecución de los algoritmos de optimización de flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman, utilizando el software HxGN MinePlan 15.8 en la generación de pit shells de acuerdo a la variación del precio del cobre.

Para el pit final seleccionado N°24, con un precio de cobre de 3.30 US$/lb, se registró un tiempo de optimización de 03 minutos y 17 segundos para el algoritmo Pseudoflow, mientras que el algoritmo Lerch & Grossman registró un tiempo de 04 minutos y 29 segundos. Estos resultados confirman la eficiencia del algoritmo Pseudoflow en términos de tiempo de optimización.

El pit final seleccionado N°24, con un precio del cobre de 3.30 US$/lb, generó un VAN de 8,784.582 MUS$ utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow, en comparación con un VAN de 8,784.466 MUS$ obtenido con el algoritmo Lerchs & Grossman. Esta diferencia de 0.116 MUS$ a favor del algoritmo Pseudoflow indica que ambos algoritmos pueden producir resultados muy similares en la determinación del límite final del tajo en la optimización minera. Sin embargo, el Pseudoflow ofrece ventajas en términos de eficiencia computacional y tiempos de procesamiento, lo que lo hace especialmente adecuado para escenarios complejos y grandes volúmenes de datos.

VI. RECOMENDACIONES

Dado el mejor rendimiento en la determinación del límite del pit final y la eficiencia en la generación de pit shells, se recomienda considerar el uso del algoritmo flujo máximo Pseudoflow en operaciones mineras a tajo abierto para optimizar los procesos de planificación y diseño de tajos.

Para una planificación minera más precisa y rentable, se sugiere utilizar parámetros técnico-económicos actualizados y específicos de cada proyecto, considerando la variabilidad en los precios de los metales, costos operativos y otros factores relevantes.

Es recomendable realizar evaluaciones periódicas de los algoritmos de optimización disponibles, como flujo máximo Pseudoflow y Lerch & Grossman, para identificar mejoras potenciales en la eficiencia y precisión en la generación de pit shells.

El uso de software especializado, como HxGN MinePlan 15.8, puede facilitar la implementación de algoritmos de optimización y el análisis de los resultados, lo que contribuirá a una toma de decisiones más fundamentada y eficiente en la planificación minera.

VII. REFERENCIAS

Amankwah, H., Larsson, T., & Textorius, B. (2014). A maximum flow formulation of a multi-period open-pit mining problem. *Operational Research*, *14*(1), 1–10. https://doi.org/10.1007/s12351-013-0140-7

Anglo American. (2021). *Integrated Annual Report 2021*. www.angloamerican.com/investors/annual-reporting

Avalos, S., & Ortiz, J. M. (2020). A guide for pit optimization with Pseudoflow in python 1. In *Annual Report*. https://pypi.org/project/pseudoflow/

Bai, X., Turczynski, G., Baxter, N., & Place, D. (2017). *Pseudoflow Method for Pit Optimization*. https://www.researchgate.net/publication/331752116

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*.

Brañes Gallardo, H. (2010). *Rentabilidad mínima en la optimización del límite final de minado*.

Cárcamo, G. M. (2018). *El efecto del precio de los minerales sobre la estructura de capital de las empresas en el Perú.* https://repositorio.ulima.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12724/8063/C%C3%A1rcamo_Valencia_Gloria_Mar%C3%ADa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castillo Delgado, L. (2009). *Modelos de optimización para la planificación minera a cielo abierto.* https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103326/castillo_ld.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Castro, D. A. S. (2021). *Aplicación del algoritmo Lerchs y Grossmann 3D para delimitar el pit final de un yacimiento cuprífero.* https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/32586/Castro Solis Daniel Aarom.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ccahuana Yucra, E. (2023). *Comparación de la metodología tradicional y la programación directa de bloques para la optimización de minas a cielo abierto en un yacimiento de cobre Skarn.* http://tesis.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/20156

Chura, H. (2019a). *Optimizar el planeamiento a largo plazo de la mina a tajo*

abierto Tacaza - Ciemsa empleando los softwares mineros Gemcom Whittle y Minesight. https://1library.co/document/qmje649q-optimizar-planeamiento-abierto-ciemsa-empleando-softwares-whittle-minesight.html

Chura, H. (2019b). *Optimizar el planeamiento a largo plazo de la mina a tajo abierto Tacaza-CIEMSA empleando los softwares mineros Gemcom Whittle y Minesight*. 166. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/10161

Colquehuanca Linares, E. R. (2016). *Planeamiento de minado a largo plazo haciendo uso del Software Whittle 4.4 Cia minera Aurífera*. https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/08337421-5edd-4460-95b0-8d203233b3c5/content

Cruz Huamani, J. (2023). *Estudio Conceptual de una mina a cielo abierto para determinar su viabilidad*. https://repositorio.unsa.edu.pe/items/46424605-7667-4f36-8873-794d63b8bfb3

Delgado Vega, J. (2009). *Planificación minera superficial y subterránea*. https://bsginstitute.com/

Deutsch, M., Dağdelen, K., & Johnson, T. (2022). An Open-Source Program for Efficiently Computing Ultimate Pit Limits: MineFlow. *Natural Resources Research*, *31*(3), 1175–1187. https://doi.org/10.1007/s11053-022-10035-w

Down, P. (1994). *Risk assessment in reserve estimation and open-pit planning*.

Espinoza, P., & Vera, M. (n.d.). *Caracterización Petromineralógica de los Yacimientos Toquepala y Cuajone*. Retrieved December 27, 2023, from https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/1521/1/B049-Boletin_Caracterizacion_petromineralogica_Toquepala-Cuajone.pdf

Freeport McMoRan. (2021). *Technical Report Summary of Mineral Reserves and Mineral Resources*. https://www.fcx.com/sites/fcx/files/documents/operations/TRS-CerroVerde.pdf

Gonzales paihua, T. (2010). *Diseño de minas a tajo abierto*.

Gonzales, T. (2010). *Diseño de minas a tajo abierto*. https://www.academia.edu/20850527/Gonzales_pt

Hartman, H. L., Mutmansky, J. M., Ramani, R. V., & Wang, Y. J. (2017). *Introductory Mining Engineering: Vol. 2nd Edition*.

Hartman, H., Mutmansky, J., & Wang, Y. (2018). *Introductory Mining Engineering*.

Henderson, R., & Turek, C. (2011). *Kinross Mine Planning Best Practice*.

Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. del pilar. (2014). Sampieri Grr. In *Antimicrobial agents and chemotherapy* (Vol. 58, Issue 12).

Herrmann, C., & Zappettini, E. O. (2014). Recursos minerales, minería y medio ambiente. In *Serie Publicaciones Nº* (Vol. 173). https://repositorio.segemar.gov.ar/bitstream/handle/308849217/2864/Libro%20recursos%20minerales%2c%20miner%c3%ada%20y%20medio%20ambiente%202014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

HexagonMining. (2020). *MinePlan for Long Term Planning*. http://www.hexagonmining.com/

Hochbaum, D. S. (2008). The Pseudoflow algorithm: A new algorithm for the maximum flow problem. *Operations Research*, *00*(0). https://doi.org/10.1287/xxxx.0000.0000

Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine Planning & Design 3rd Edition*. https://zarmesh.com/wp-content/uploads/2020/01/Open-Pit-Mine-Planning-and-Design-Hustrulid-William-A._-Kuchta-Mark_-Martin-Randall-K-Open-Pit-Mine-Planning-and-Design-Two-Volume-Set-CD-ROM-Pack-Third-Edition-CRC-Press-2013.pdf

IIMP. (2018). *Manual de Diseño Geotécnico de Minas a Cielo Abierto y Subterráneas*. www.estudiosmineros.com

Kapageridis, I. (2018). *Application of the Push-Relabel Algorithm to Lignite Surface Mine Optimisation*. https://www.researchgate.net/publication/327884774

Latorre Eduardo. (2015). *Incorporación del valor del dinero en el tiempo para la determinación de límites económicos de un open pit.* https://repositorio.uc.cl/handle/11534/15600

Lerchs, & Grossmann. (1965). *H. Lerchs and I. F. Grossmann - 1965 - Optimum Design of Open Pit Mines PDF | PDF | Vertex (Graph Theory) | Graph Theory*. https://es.scribd.com/document/461414933/H-Lerchs-and-I-F-Grossmann-1965-Optimum-design-of-open-pit-mines-pdf

Loor Valeria. (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

Ludeña, L. (2020). *Modelamiento, Cálculo de reservas y diseño de Pit Final,*

mediante el procesamiento de data de perforación diamantina en un depósito porfirítico, Distrito Cashapampa - Ancash 2020.

Maksaev, V. (2004). *Porfidos Cupriferos Depósitos de Cu (Mo) de gran tonelaje y baja ley*. 1–12.

Marquina, J. J. (2023). *Delimitación del pit final mediante el modelo matemático flujo máximo pseudoflow en minas a tajo abierto*. https://www.coursehero.com/file/79039057/7-Optimizacion-en-la-Estimacion-de-Recursos-y-Limite-de-la-Explotacion-en-el-Proyecto-Michiquillay/?userType=student

Martínez-Valladares, W., Marchena, A., Otero, J., Cervantes, J., & León, W. (2017). Geología y controles Tectonomagmáticos de los Sistemas Porfiríticos en el Arco Magmático Occidental Sur de Perú. *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - Ingemmet Dirección de Recursos Minerales y Energéticos - DRME Programa*, 113. https://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/866343/Geologia+de+los+sistemas+porfiricos+del+sur+de+Peru__.pdf

Mbolela A, K., Mukombo Jr, M., Kisumpa M, N., & Kalej D, M. (2019). *Optimization of Open Pit Mining under Surpac and Whittle - Application to the Ruashi II and III Deposits*. *8*(6), 2197–2211. https://www.ijsr.net/archive/v8i6/30051902.pdf

Meagher, C., Dimitrakopoulos, R., & Avis, D. (2014). Optimized open pit mine design, pushbacks and the gap problem—a review. *Journal of Mining Science*, *50*(3), 508–526. https://doi.org/10.1134/S1062739114030132

Mendoza, J. A. B. (2021). *Optimización del valor presente neto aplicando secuenciamiento de fases direccionadas en el diseño del pit del proyecto Cotabambas – Panoro Minerals*. https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/49686620-1a08-4818-a50d-acbf4746fc10/content

Mendoza, M. (2014). *Optimización de alternativas de pit final del tajo pukaqaqa grupo milpo - Huancavelica - Perú*. https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f57e44cd-afd2-49f6-8bde-461c8559902e/content

Micon International. (2020). *Estimación de Recursos Minerales*. Micon International. https://www.micon-international.com/es/los-10-consejos-

principales-para-una-estimacion-de-recursos-minerales/

Minas Riotinto. (2019). *Minas Riotinto - Proceso minero*. Minas Riotintohttps://minasderiotinto.webnode.es/mineria/

MINEM. (2022). *Anuario Minero 2022*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4700376/2022.pdf?v=1689975935

Miranda, F. (2017). *Alineamiento de la Selección del Pit Final con la Optimización del Secuenciamiento Estratégico*.

Miranda Jéldez, F. (2017). *Alineamiento de la selección del pit final con la optimización del secuenciamiento estratégico*.

Muir, D. C. W. (2004). *Pseudoflow, New Life for Lerchs-Grossmann Pit Optimisation*. https://www.researchgate.net/publication/280082017

Musenge, P., & Chanda, E. K. (2022). *Ultimate Pit Limits using Maximum Flow Algorithm Ford and Fulkerson : The Case of Study of North Mutoshi Project , DRC*. *11*(02), 272–282. https://www.ijert.org/research/ultimate-pit-limits-using-maximum-flow-algorithm-ford-and-fulkerson-the-case-of-study-of-north-mutoshi-project-drc-IJERTV11IS020118.pdf

Peirano, F. (2011). *Definición de pit final capacitado bajo incertidumbre*. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/102605/cf-peirano_fo.pdf?sequence=3

Pérez Sangabriel, E. (2023). *Planeación a Largo Plazo de Minas a Cielo Abierto con MinePlan 3D*. http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/RepoFi/18930/Tesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y

Poniewierski, J. (2018). *Pseudoflow Explained A discussion of Deswik Pseudoflow Pit Optimization in comparison to Whittle LG Pit Optimization*.

Quispe Zinancuya, C. (2019). *Optimización en el planeamiento a largo plazo, con la programación directa de bloques frente a la metodología de planeamiento tradicional*.

Rodriguez, E. (2005). *Metodología de la investigación*. https://www.academia.edu/37714580/Metodolog%C3%ADa_de_la_investigaci%C3%B3n_Ernesto_A_Rodr%C3%ADguez_Moguel_LIBROSVIRTUAL

Rojas Nataly. (2019). *Implementación de programa de aseguramiento y control de*

calidad (QA/QC) para el muestreo de detritos en depósitos tipo pórfido de cobre. https://1library.co/document/yj7lggky-implementacion-programa-aseguramiento-control-muestreo-detritos-depositos-porfido.html

Runge, I. C. (Ian C. (1998). *Mining economics and strategy*. 295. https://books.google.com/books/about/Mining_Economics_and_Strategy.html?hl=es&id=nPVb3AHHVgYC

Seguel Siglic, S. (2017). *Incorporación de atributos geometalurgicos e incertidumbre geologica en la definicion del pit final y la secuencia de extraccion de largo plazo.* https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/147428/Incorporacion-de-atributos-geometalurgicos-e-incertidumbre-geologica-en-la-definicion.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Vergara, R. A. T. (2020). Comparación de metodologías para la optimización de yacimientos mineros a rajo abierto. *Corporate Governance (Bingley)*, *10*(1), 54–75. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/175507/Comparación-de-metodologías-para-la-optimización-de-yacimientos-mineros-a-rajo-abierto.pdf?sequence=1

Vidal, L. (2023). *Costos unitarios de minado y valorizaciones para evaluar la rentabilidad en la empresa minera artesanal Tomas Huamán Camacho, Pataz 2023*. https://dspace.unitru.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9a829671-907b-4894-9859-01a5e661be2b/content

Wills, B., & Finch, J. (2016). *An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery.*

Wood Group. (2022). *Cuajone Operations Peru Technical Report Summary*. https://minedocs.com/24/Cuajone-TR-12312022.pdf

Xiaoyu, V., Turczynski, G., Baxter, N., & Place, D. (2017). *Pseudoflow Method for Pit Optimization*. https://www.researchgate.net/publication/331752116

Yucra, W., & Wilber, H. (2013). *Optimización y planificación para la explotación del tajo Minas Pampa*. https://repositorio.unamba.edu.pe/bitstream/handle/UNAMBA/415/T_0026.pdf?sequence=1&isAllowed=y

VIII. ANEXOS

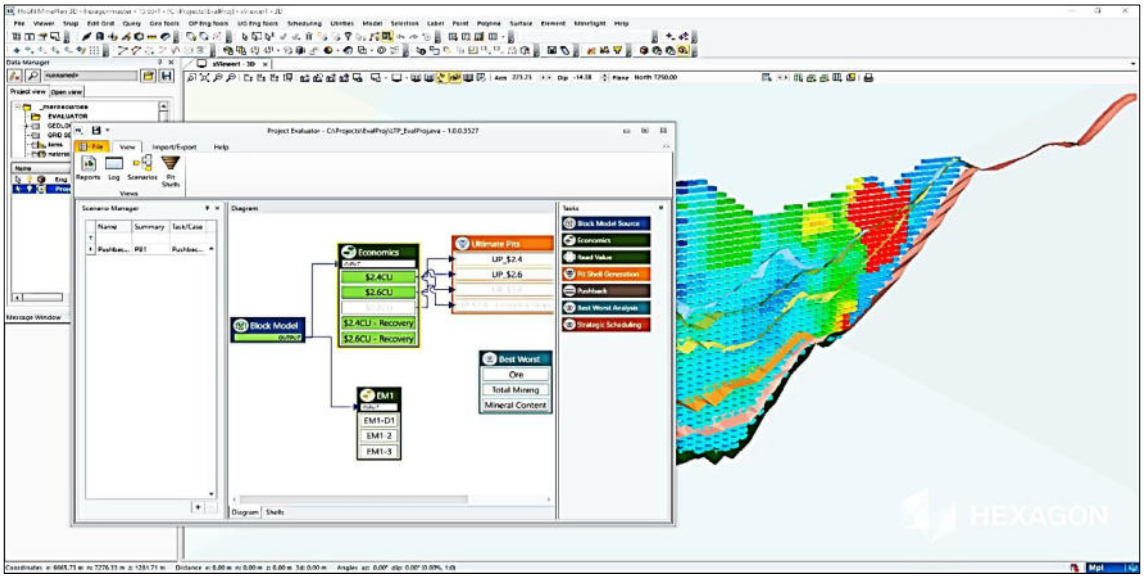
ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA.

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variable	Indicadores	Eq. e Inst. de medición	Metodología de investigación
Problema general	**Objetivo general**	**Hipótesis general**	**Variable independiente**		**Equipo de medición**	**Tipo de investigación:**
¿Permitirá la propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow determinar el límite del pit final de forma más eficiente que el algoritmo Lerch & Grossman?	Evaluar si la propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permite determinar el límite del pit final de forma más eficiente que el algoritmo Lerch & Grossman en minería.	La propuesta del uso del algoritmo de optimización flujo máximo Pseudoflow permitirá determinar el límite del pit final de forma más eficiente ante el algoritmo Lerch & Grossman.	• Algoritmos de optimización de pit.	• Precio del cobre.	• Ordenador portátil. **Instrumento de medición** • Software HxGN MinePlan.	• Aplicada **Nivel de investigación:** • Descriptiva comparativa. **Diseño de investigación:**
Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**	**Variable dependiente**			
• ¿Cuáles son los parámetros necesarios para delimitar el pit final?	• Identificar los parámetros necesarios para delimitar el pit final.	• El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor que el algoritmo Lerch & Grossman.	• Eficiencia de optimización pit shells.	• Tiempo de optimización.	• Registro de tiempos de optimización.	• Experimental. **Población:**
• ¿El tiempo de optimización del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es menor que el algoritmo Lerch & Grossman?	• Determinar si el tiempo de optimización del pit final utilizando el algoritmo Pseudoflow es menor que utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.	• El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.		• VAN	• Reporte de análisis de casos de optimización.	• Unidad minera Cuajone **Muestra:**
• ¿El VAN obtenido del pit final seleccionado utilizando el algoritmo de flujo máximo Pseudoflow es mayor al VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman?	• Determinar si el Valor Actual Neto (VAN) obtenido del pit final utilizando el algoritmo Pseudoflow es mayor que el VAN obtenido utilizando el algoritmo Lerch & Grossman.					• Pit Shells

Nota. Elaboración propia.

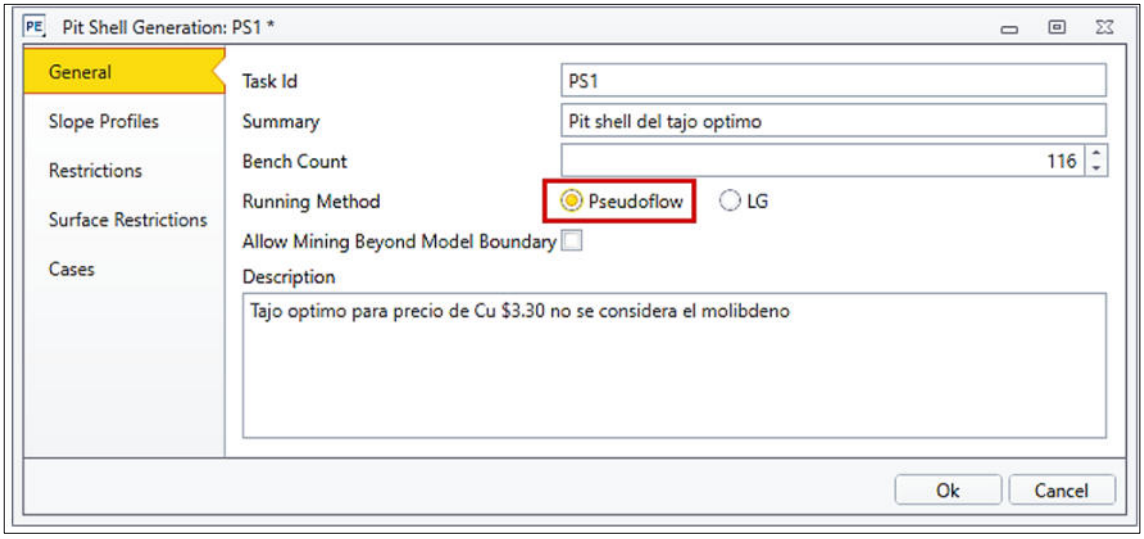
ANEXO 2

CONFIGURACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE PIT EN PROJECT EVALUATOR DE HEXAGON MINEPLAN 15.8.

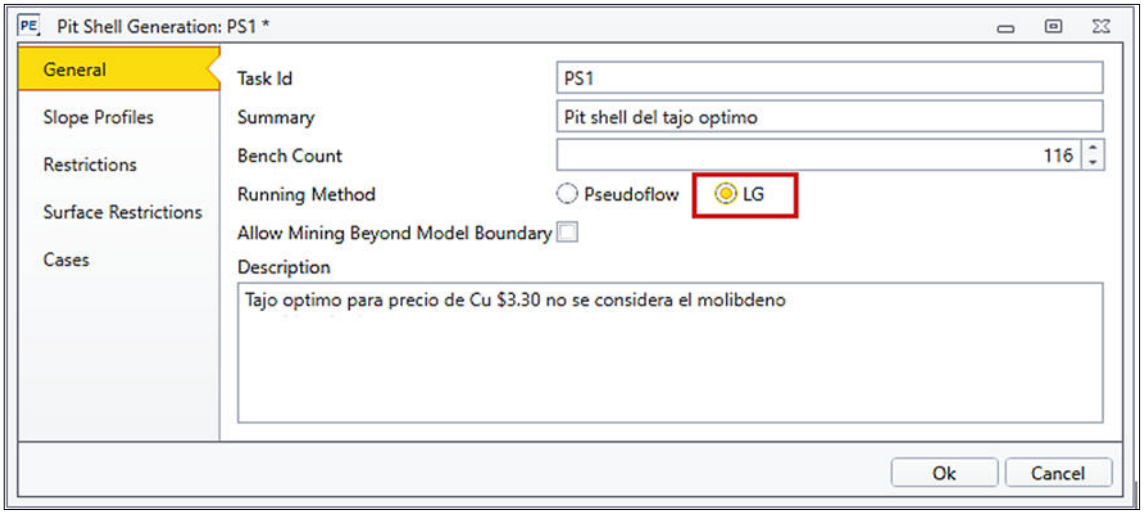


Nota. HxGN MinePlan Project Evaluator. *https://blog.hexagonmining.com*

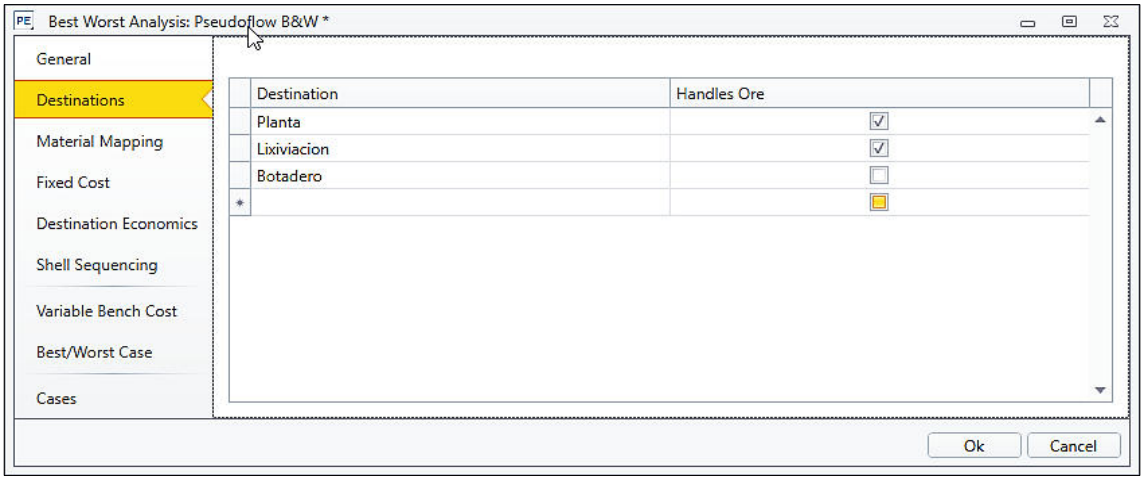
Selección del método matemático de optimización.



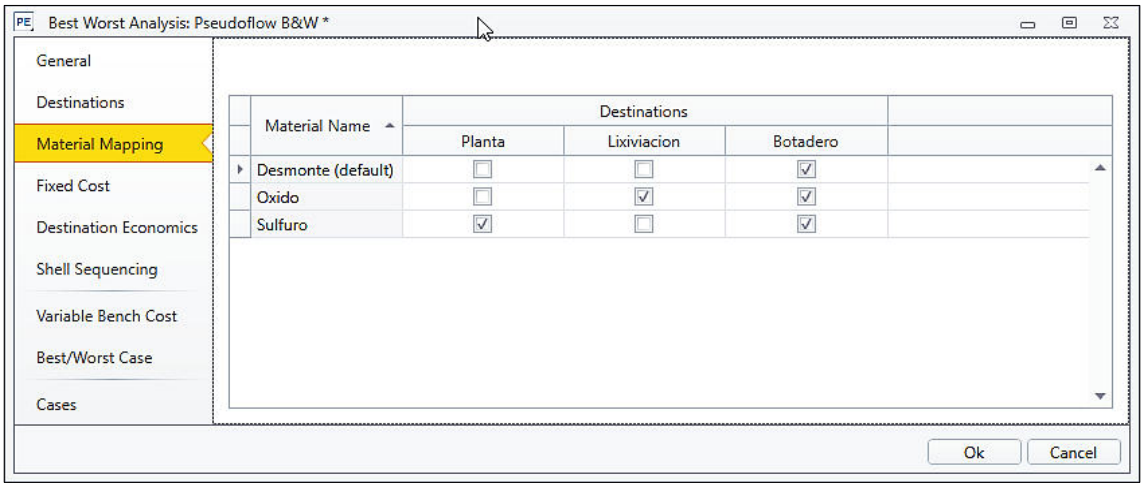
Nota. Selección del método de optimización Pseudoflow HxGN MinePlan Project Evaluator.



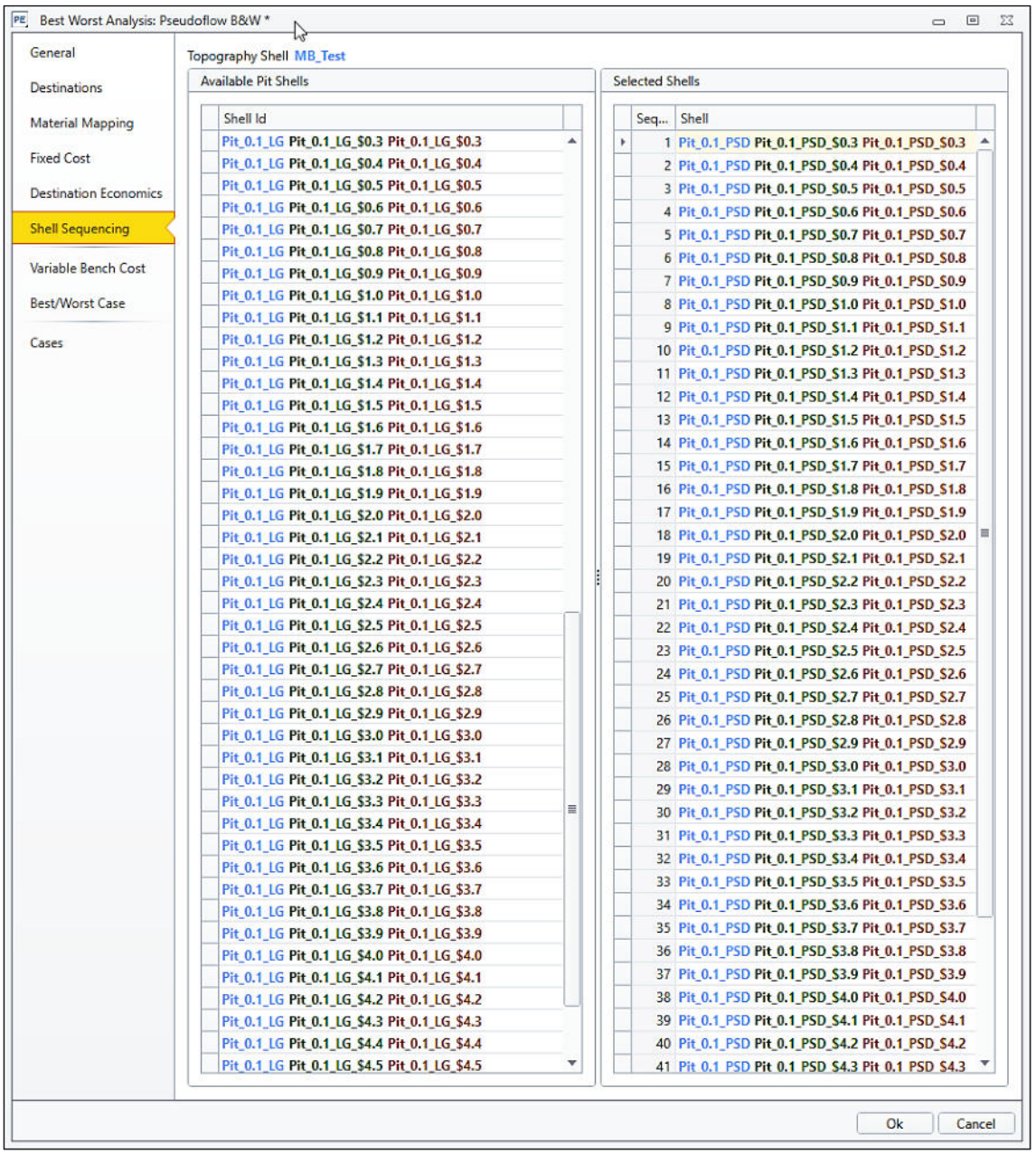
Nota. Selección del método de optimización Lerch & Grossman HxGN MinePlan Project Evaluator.



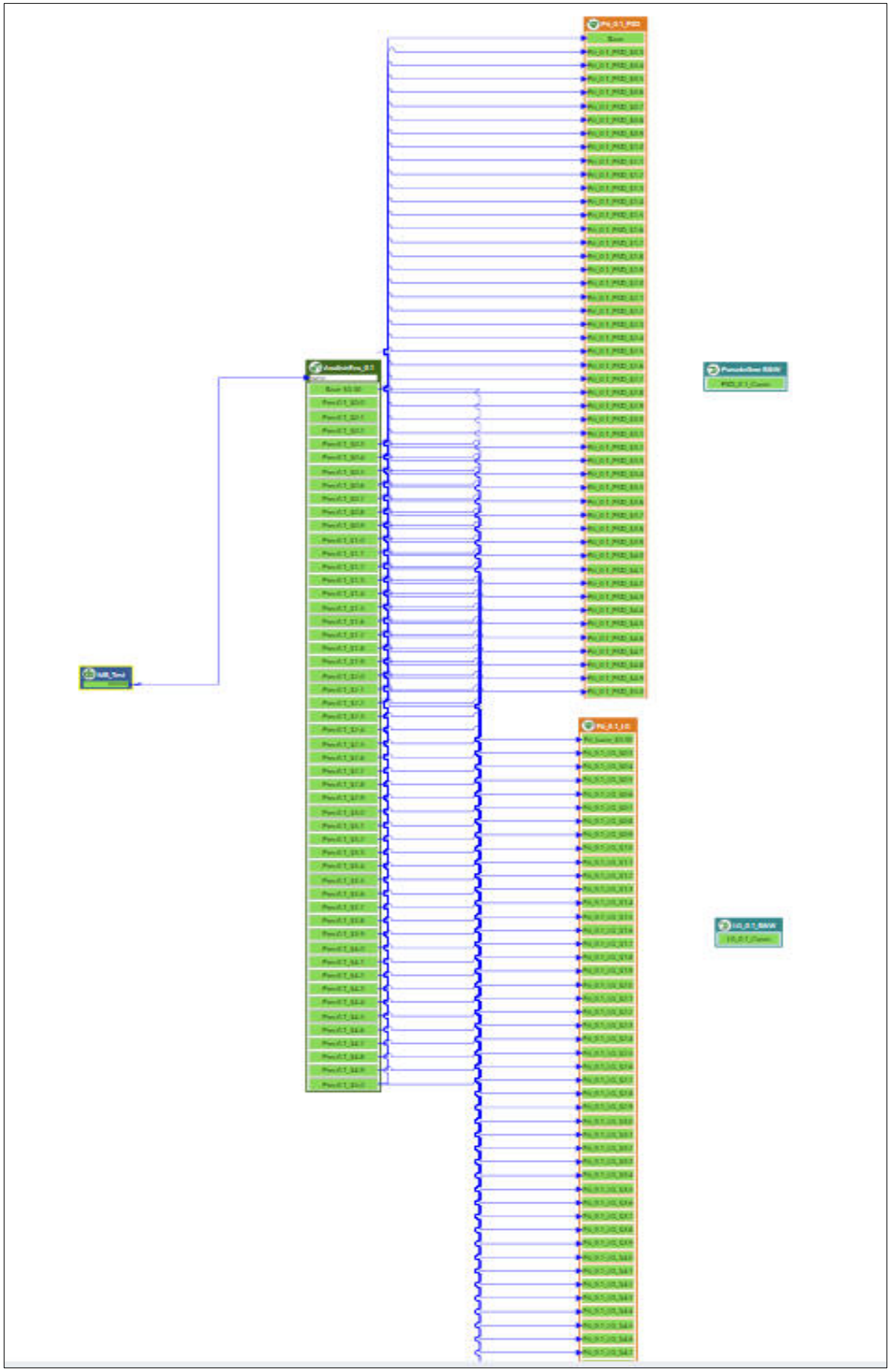
Nota. Selección de los destinos de acuerdo al tipo de material.



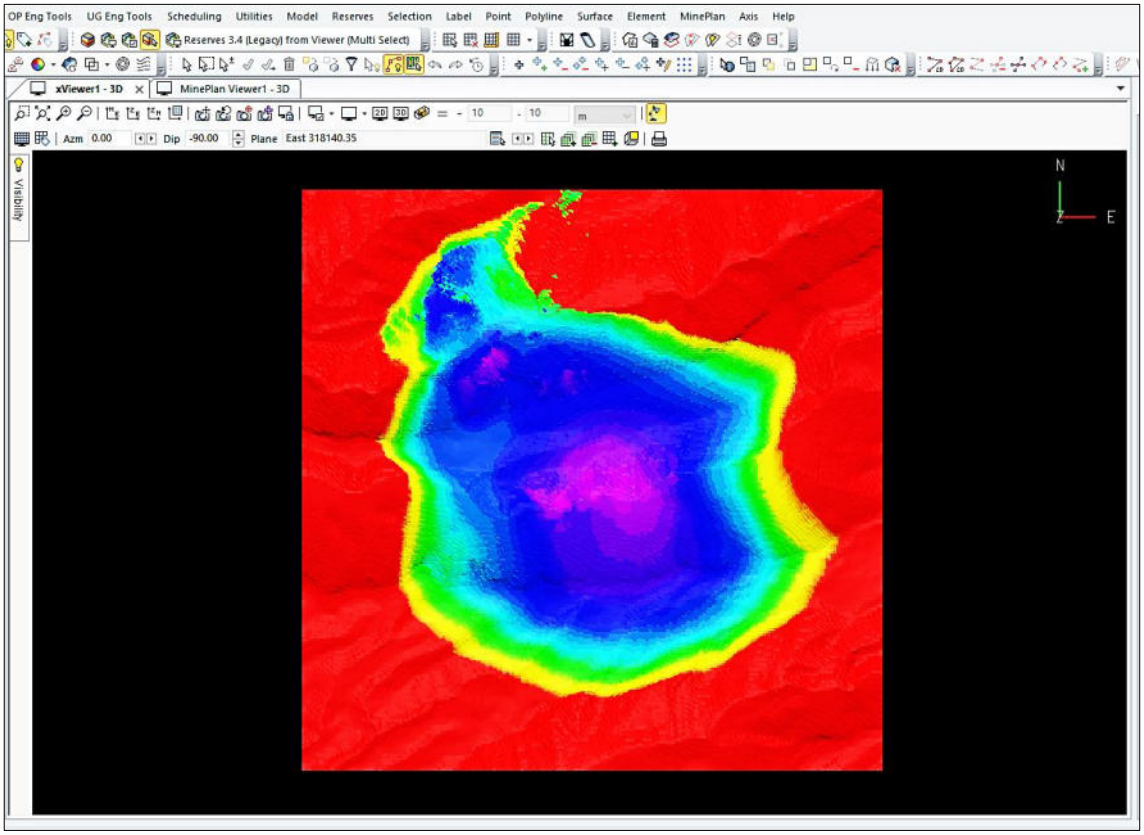
Nota. Configuración del material mapping.



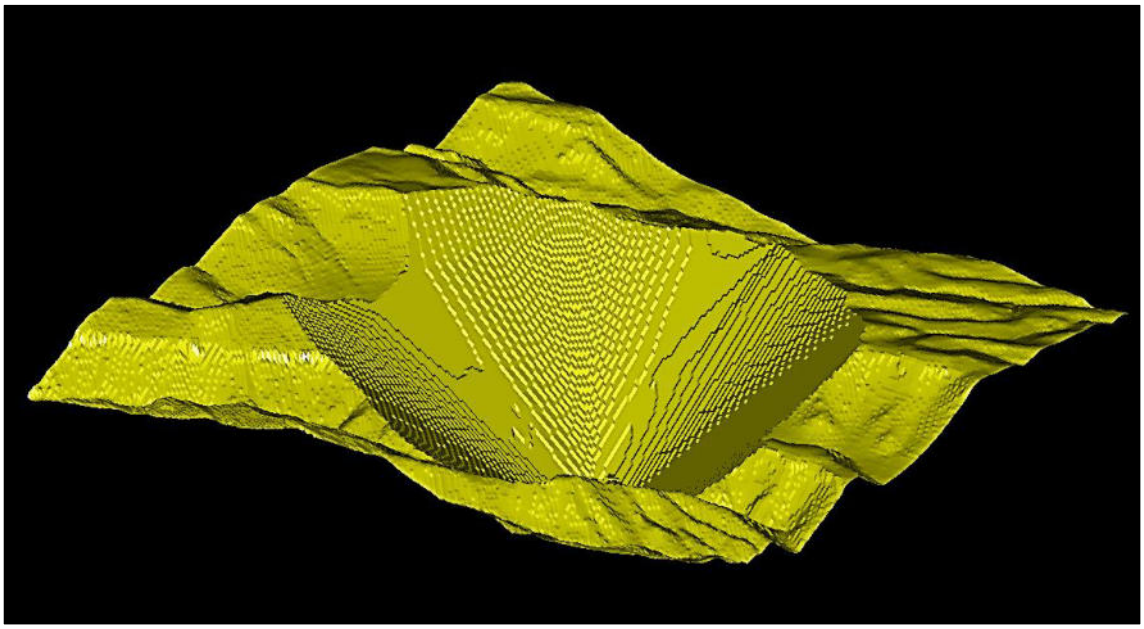
Nota. Pit shells generados de acuerdo al método de optimización.



Nota. Pit shells generados de acuerdo al método de optimización y la variación de precios.



Nota. Modelo digital de Pit Shells generados, vista en planta.



Nota. Modelo digital de pit final optimizado, calculado a través de parámetros económicos y de operatividad.

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : Victor Daniel Mamani Laura
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : 72448482
Correo electrónico : victordaniel0123@gmail.com
Teléfono/Celular : 983199295

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (X)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis (X)
b) Trabajo de Investigación ( )
c) Trabajo de suficiencia profesional ( )
d) Trabajo académico ( )

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : "Optimización del pit final mediante el método de flujo máxima pseudoflow en una unidad minera superficial"
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : .....
c) Fecha de publicación : .....

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Jorge Luis tomas Florez Salas
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 00780320
c) ORCID : 0000-0003-4971-4330

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72448482
NOMBRES Y APELLIDOS : Victor Daniel Mamani Laura

02 02

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 72442422

NOMBRES Y APELLIDOS : Victor Daniel Mamani Laura

FECHA : 12-06-2024



ANEXO VIII

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, ...Victor...Daniel.....Mamani...Laura.....,
bachiller de la Escuela Profesional de:
...Ingeniería...de...Minas.....,
de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado(a) con DNI N°... ....., autor(a) del Trabajo de Investigación / Tesis / Trabajo de suficiencia profesional denominado:
..."Optimización...del...P.I...final...mediante...el...método...de...ruta...máxima...pseudoflow.....
.....en...una...unidad...minera...superficial"....
.....
.....

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que, el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, .12..de..junio..de..2024.....



Huella digital

Nombres y Apellidos: Victor Daniel Mamani Laura
DNI: 72448482

- 16 -

CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

Informe de Tesis - Victor Mamani Laura 2024

5% Textos sospechosos

- **5%** Similitudes
  - < 1% similitudes entre comillas
  - < 1% entre las fuentes mencionadas
- < 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: Informe de Tesis - Victor Mamani Laura 2024.pdf
ID del documento: 98f1677d817b53e4ac37e74107218e224e822a6a
Tamaño del documento original: 4,12 MB

Depositante: JORGE LUIS TOMAS FLOREZ SALAS
Fecha de depósito: 17/5/2024
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 17/5/2024

Número de palabras: 23.744
Número de caracteres: 165.566

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.unsa.edu.pe https://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/13653/IMmebeja.pdf **2 fuentes similares**	1%		Palabras idénticas: 1% (304 palabras)
2	repositorio.upn.edu.pe https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/11537/32586/1/Castro Solis Daniel Aarom.pdf	1%		Palabras idénticas: 1% (271 palabras)
3	repositorio.upn.edu.pe https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/28848/Tesis.pdf **2 fuentes similares**	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (86 palabras)
4	idoc.pub | Yacimiento Tipo Porfido De Cobre [34wmjvxz5ml7] https://idoc.pub/documents/yacimiento-tipo-porfido-de-cobre-34wmjvxz5ml7 **2 fuentes similares**	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (70 palabras)
5	repositorio.uchile.cl https://repositorio.uchile.cl/bitstream/2250/148173/1/Alineamiento-de-la-Seleccion-del-Pit-Final-con...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (60 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	**repositorio.unsa.edu.pe** | Optimización del valor presente neto aplicando secuenc... https://repositorio.unsa.edu.pe/items/aced7816-21c1-44d1-8e8c-acb9271760d6	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
2	**Documento de otro usuario** #31620e El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)
3	**1library.co** | GÉNESIS DE CUAJONE - Gráfico 5.1.2-1 Controles geológicos por tipo d... https://1library.co/article/génesis-cuajone-gráfico-controles-geológicos-alteración-modelo-tridim.y4...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
4	**repositorio.uc.cl** | Incorporación del valor del dinero en el tiempo para la determi... https://repositorio.uc.cl/dspace/handle/11534/15600	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (30 palabras)
5	**www.redalyc.org** | Implementation of Software DESWIK® for a polymetallic deposi... https://www.redalyc.org/journal/496/49674890018/html/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (24 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1. https://www.researchgate.net/publication/331752116
2. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103326/castillo_ld.pdf?seq
3. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/32586/Castro
4. https://1library.co/document/qmje649q-optimizar-planeamiento
5. http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/10161

DECENIO DE LA IGUALDAD DE OPORTUNIDADES PARA MUJERES Y HOMBRES
"AÑO DEL BICENTENARIO, DE LA CONSOLIDACIÓN DE NUESTRA INDEPENDENCIA, Y DE LA CONMEMORACIÓN DE LAS HEROICAS BATALLAS DE JUNÍN Y AYACUCHO"

RESOLUCIÓN DE COMISIÓN ORGANIZADORA Nº 493-2024-UNAM/CO

Moquegua, 22 de julio de 2024

LA COMISIÓN ORGANIZADORA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

VISTOS:

El Acuerdo de Sesión Extraordinaria de Comisión Organizadora de fecha 19 de julio de 2024; PROVEÍDO N° 10340-2024 de fecha 19 de julio de 2024 emitido por la Presidencia de la Comisión Organizadora; INFORME N° 409-2024-UNAM-CO-P/SG de fecha 19 de julio de 2024 emitido por la Secretaría General; CARTA Nº 122-2024-GYT/UNAM-PCAS de fecha 18 de julio de 2024 emitido por el Especialista de Grados y Títulos; Sobre el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas y demás documentos que escoltan el expediente administrativo, y;

CONSIDERANDO:

Que, la Constitución Política del Perú en su artículo 18º prevé que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico, y el artículo 8º de la Ley Nº 30220, Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y las Leyes de la República e implica las organizaciones de su sistema académico, económico y administrativo, así como la administración de sus bienes y rentas, elaborar su presupuesto y aplicar sus fondos con la responsabilidad que impone la Ley;

Que, de conformidad con la Ley N° 28520 de fecha 23/05/2005, se creó la Universidad Nacional de Moquegua, cuyo artículo 1º dispone: "créase la Universidad Nacional de Moquegua como persona jurídica de derecho público interno, con sede en la ciudad de Moquegua, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua". Asimismo, a través de la Resolución del Consejo Directivo N° 103-2017-SUNEDU/CD, el Concejo Directivo de la SUNEDU, le otorgó la Licencia Institucional a la Universidad Nacional de Moquegua; la misma que fue modificada a través de la Resolución del Consejo Directivo N° 135-2022-SUNEDU/CD;

Que, el artículo 29° de la Ley Universitaria, Ley N° 30220, establece que, aprobada la ley de creación de una universidad pública, el Ministerio de Educación (MINEDU), constituye una Comisión Organizadora integrada por tres (3) académicos de reconocido prestigio, que cumplan los mismos requisitos para ser Rector (...). Esta Comisión tiene a su cargo la aprobación del estatuto, reglamentos y documentos de gestión académica y administrativa de la universidad, formulados en los instrumentos de planeamiento, así como su conducción y dirección hasta que se constituyan los órganos de gobierno que, de acuerdo a la presente Ley, le correspondan";

Que, mediante Resolución Viceministerial Nº 011-2024-MINEDU de fecha 31/01/2024, se reconformó la Comisión Organizadora de la Universidad Nacional de Moquegua, integrada por los académicos: Dr. Jorge Lázaro Franco Medina, como Presidente; Dr. Edwin Molina Porcel, como Vicepresidente Académico y Dr. Avid Roman Gonzalez, como Vicepresidente de Investigación;

Que, el artículo 58° de la Ley Universitaria, Ley Nº 30220, concordado con el artículo 14º del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado con Resolución de Comisión Organizadora Nº 578-2021-UNAM, establecen que el **Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la universidad.** En el caso de la Universidad Nacional de Moquegua, dada su condición y naturaleza, corresponde ejercer dicha atribución a la Comisión Organizadora quien hace las veces de Consejo Universitario, disposición relacionada con la Resolución Viceministerial N° 244-2021-MINEDU y sus modificatorias;

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

///... **Resolución de Comisión Organizadora N° 493-2024-UNAM/CO**

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...);

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa **los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis** o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410, 453 y 890-2022; N° 880-2023 y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, mediante la CARTA N° 122-2024-GYT/UNAM-PCAS, el Especialista del Área de Grados y Títulos, remite a Secretaria General, la relación de dos (2) bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios[1], exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, razón por la cual la Secretaría General incluye los expedientes como punto de agenda para ser tratado en Sesión de Comisión Organizadora de fecha 19 de julio de 2024;

Que, se ha establecido como atribución de la Comisión Organizadora de la UNAM, la facultad de conferir los grados académicos y los títulos profesionales (...), por lo que en mérito al pedido del Secretario General y debatido el caso en Sesión Extraordinaria de fecha 19 de julio de 2024, se acordó por unanimidad **conferir a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de la Sustentación de Tesis, a dos (2) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional de Moquegua**;

---

[1] Artículo 122°. - Requisitos para la obtención del Título Profesional
Para obtener el Título Profesional el interesado deberá presentar ante su Escuela Profesional un expediente con la siguiente documentación:

a. Solicitud dirigida al Director de la Escuela Profesional o quien haga sus veces, indicando la fecha y numero de comprobante de pago.
b. Dos (2) fotografías de frente, tamaño pasaporte a color con fondo blanco (con traje formal); para garantizar la seguridad ciudadana.
c. Dos ejemplares de la Tesis, del Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe del Examen Profesional en físico, uno para la Biblioteca y otro para la Escuela Profesional, y un CD con la versión digital.
d. Formulario de autorización del graduado para la publicación de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional en el repositorio.
e. Declaración Jurada de originalidad de la Tesis, Trabajo de Suficiencia Profesional o Informe de Examen Profesional.

La Escuela Profesional es responsable de completar el expediente del bachiller en un plazo máximo de 3 días hábiles y derivar a la Oficina de Secretaría General, adjuntando los siguientes documentos:

a. Copia del acta de sustentación indicando la modalidad de obtención del título profesional.
b. Constancia de "no adeudo" de Bienes a la Universidad, bienes a los Laboratorios Básicos y de Especialidad, material bibliográfico; dichos documentos deberán ser refrendados por los responsables a cargo.

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

///... **Resolución de Comisión Organizadora Nº 493-2024-UNAM/CO**

Que, mediante la Resolución Presidencial Nº 156-2024-UNAM-CO/P de fecha 18 de julio de 2024, se encargó las funciones y atribuciones inherentes del despacho de la Presidencia de la Comisión Organizadora de la Universidad Nacional de Moquegua al Dr. Edwin Molina Porcel, Vicepresidente Académico, por el día 22 de julio de 2024;

Estando en uso de las facultades y atribuciones conferidas en el artículo 18° de la Constitución Política del Perú; la Ley N° 30220, Ley Universitaria; el Documento Normativo denominado: "Disposiciones para la Constitución y Funcionamiento de las Comisiones Organizadoras de las Universidades Públicas en proceso de Constitución", aprobado mediante la Resolución Viceministerial N° 244-2021-MINEDU y sus modificatorias, y en la Resolución Viceministerial Nº 011-2024-MINEDU, así como en el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua y demás normas concordantes;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO PRIMERO: CONFERIR, a nombre de la Nación el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS**, por la modalidad de la Sustentación de Tesis, a la Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Moquegua, que se consigna en el listado siguiente:

1. **VICTOR DANIEL MAMANI LAURA**

   TESIS : "OPTIMIZACIÓN DEL PIT FINAL MEDIANTE EL MÉTODO DE FLUJO MÁXIMO PSEUDOFLOW EN UNA UNIDAD MINERA SUPERFICIAL", cuyo Asesor fue el Mgr. Jorge Luis Tomas Florez Salas.

2. **LUIS ENRIQUE RODRIGUEZ TORANZO**

   TESIS : "APLICACIÓN DEL MÉTODO NUMÉRICO DE NICHOLAS PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MINADO DE LA VETA FLOR EN LA UNIDAD MINERA EL NUEVO SUREÑO", cuyo Asesor fue el Dr. Arquímedes León Vargas Luque.

ARTÍCULO SEGUNDO: AUTORIZAR, a la Secretaria General de la Universidad Nacional de Moquegua, expedir y registrar los Diplomas correspondientes para su otorgamiento.

ARTÍCULO TERCERO: ENCARGAR al Área de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, para que realice las acciones pertinentes conducentes, relacionadas con la inscripción de los grados y títulos en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO CUARTO: NOTIFICAR, la presente Resolución a todas las instancias y dependencias administrativas y académicas de la Universidad Nacional de Moquegua, para su conocimiento, cumplimiento y demás fines pertinentes.

ARTÍCULO QUINTO: ENCARGAR, a la Oficina de Tecnología de la Información, la publicación de la presente Resolución en el portal de transparencia de la Universidad Nacional de Moquegua.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE, CÚMPLASE Y ARCHÍVESE.

DR. EDWIN MOLINA PORCEL
Presidente (e) de la Comisión Organizadora
Universidad Nacional de Moquegua

ABOG. KEVIN YUVER CHIHUAN QUISPE
Secretario General
Universidad Nacional de Moquegua

Domicilio Fiscal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe