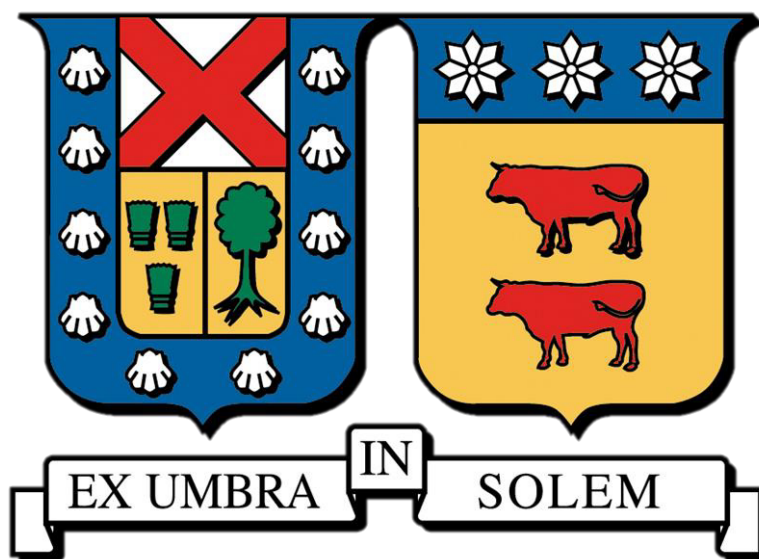


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO - CHILE



**CÓDIGO PYTHON PARA SELECCIÓN DE BORDE
ECONÓMICO PARA LA EXPLOTACIÓN POR
HUNDIMIENTO DE SUBNIVELES**

IGNACIO ALEJANDRO MANTEROLA MUÑOZ

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS**

PROFESOR GUÍA
VICTOR ENCINA MONTENEGRO

AGOSTO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: CÓDIGO PYTHON PARA SELECCIÓN DE BORDE ECONÓMICO PARA LA EXPLOTACIÓN POR HUNDIMIENTO DE SUBNIVELES

Nombre del candidato(a): IGNACIO ALEJANDRO MANTEROLA MUÑOZ

Carrera / Grado: INGENIERIA CIVIL EN MINAS

Campus: Santiago San Joaquín ; **Departamento:** INGENIERÍA EN METALÚRGICA Y DE MATERIALES

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Víctor Encina Montenegro, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12/09/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12/09/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

*No elegimos como partimos en esta vida
la grandeza real
es lo que hacemos con las cartas que nos tocan.*

Agradecimientos

Si existiera una forma perfecta de cerrar un proceso, me gustaría que me la enseñaran, porque la realidad es que no existe. Durante toda mi vida universitaria pensé en este momento, creyendo que sería simplemente un obstáculo más, uno que superaría y dejaría atrás. Sin embargo, fue mucho más que eso.

No sé exactamente qué ocurrió conmigo durante este proceso, pero tengo claro que ya no soy el mismo que alguna vez pisó la universidad en primer año. Es un sentimiento duro darse cuenta de que el mundo sigue avanzando a tu alrededor mientras muy pocos están dispuestos a arriesgar algo por ti, incluso cuando uno siente que sería capaz de arriesgarlo todo por los demás. Muchas veces sentí que entregué mucho sin esperar nada a cambio, pero al final todo parece diluirse en el ritmo de la vida de los demás. Y quizás eso también es parte de mi responsabilidad: nunca supe —o nunca quise— inmiscuirme en las vidas ajenas como otros parecen hacerlo con naturalidad.

No me gusta aparentar ni jugar a tener múltiples opciones. Siempre he considerado eso algo vacío y denigrante para el alma de una persona. Aun así, comprendo por qué muchos lo hacen y por qué, a veces, puede ser necesario.

Hoy puedo mirar hacia adelante y decir, con seguridad, que soy una gran persona. Pero una gran persona no se construye sola. Uno debe aprender a respetar y a agradecer a quienes estuvieron allí, en el camino.

Agradezco profundamente a mi padre, por su infinita paciencia y su cariño incluso en mis momentos más bajos. A mi madre, por su fuerza y por saber zarandearme cuando era necesario, ayudándome a entender que, a pesar de una larga racha de mala suerte, siempre hay espacio para levantarse y ser mejor.

A mis amigos, los Finteros, por sus palabras de apoyo y afecto. Formamos un grupo que increíblemente se mantuvo unido e íntegro desde el inicio de la universidad: muchas risas, muchos momentos, toda una vida forjada a su lado. En especial, agradezco a Pablo, a quien siempre vi como un mentor. Durante el desarrollo de esta memoria, fue quien más me ayudó a ordenar mis ideas. También a David, que, aunque hoy hablamos menos, siempre se preocupó sinceramente por cómo estaba y cómo me iba.

Y finalmente, a mi profesor guía, el profesor Encina. Cuando nadie parecía tener confianza ni intención, él creyó en mí y me confió este tema. Le agradezco profundamente por darme la oportunidad de demostrar de lo que soy capaz.

Hoy sé que aún hay mucho por hacer y mucho por organizar. Pero tengo la firme intención de demostrar que puedo ser uno de los mejores profesionales allá afuera. Y eso se lo debo, en gran parte, a todos ustedes.

Gracias totales.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una herramienta computacional en lenguaje Python que permita determinar el borde económico de un yacimiento minero evaluado para ser explotado por el método de hundimiento por subniveles (Sublevel Caving, SLC). Este método, utilizado en minería subterránea para depósitos de desarrollo vertical relativamente masivos emplazados en roca de poco fracturamiento in situ, preferentemente en los que el material diluyente sea de fácil o bajo costo de separación.

Actualmente, la planificación de bordes económicos bajo el método SLC suele realizarse manualmente, utilizando Excel o aplicando los módulos de delimitación de caserones que forman parte de los distintos paquetes de software para diseño minero. En el primer caso es un proceso lento que requiere mucha habilidad del planificador y en el segundo hay que disponer del software cuyas licencias de uso suelen tener altos costos. Ante esta limitación, se propone una solución preliminar que sirva de base para desarrollar un software abierto que permita automatizar este análisis y facilitar la toma de decisiones en etapas tempranas del diseño minero.

La metodología seguida se compone de tres etapas principales: el diseño lógico del proceso mediante diagramas de flujo, la programación del núcleo del seleccionador y el desarrollo de una interfaz gráfica para el usuario. El sistema permite cargar modelos de bloques valorizados en formato .csv, calcular el beneficio económico de las unidades de explotación y determinar el borde óptimo de extracción que maximiza la rentabilidad esperada por subnivel, considerando costos de preparación y producción.

Como resultado, la herramienta entrega visualizaciones tridimensionales del modelo, mapas térmicos de bordes óptimos, gráficas de beneficio acumulado por piso, y una vista en planta por subnivel, lo cual facilita el diseño de contornos de explotación de los subniveles. Su aplicación fue validada exitosamente en dos modelos de prueba, demostrando su funcionalidad y eficiencia.

En conclusión, el optimizador desarrollado cumple con los objetivos propuestos y representa un aporte práctico al proceso de planificación minera subterránea, al permitir un análisis técnico-económico más rápido, claro y estructurado desde etapas tempranas del proyecto.

ABSTRACT

The objective of this work is to develop a computational tool in Python that allows determining the economic boundary of a mining deposit evaluated for exploitation using the sublevel caving (SLC) method. This method is used in underground mining for relatively massive vertical deposits located in rock with little fracturing in situ, preferably where the diluent material is easy or inexpensive to separate.

Currently, economic boundary planning under the SLC method is usually done manually, using Excel or applying the block delimitation modules that are part of the various mining design software packages. In the first case, it is a slow process that requires a great deal of skill on the part of the planner, and in the second, it is necessary to have the software, whose licenses are often expensive. Given this limitation, a preliminary solution is proposed that will serve as the basis for developing open software that will automate this analysis and facilitate decision-making in the early stages of mine design.

The methodology followed consists of three main stages: the logical design of the process using flowcharts, the programming of the core selector, and the development of a graphical user interface. The system allows users to upload valued block models in .csv format, calculate the economic benefit of the mining units, and determine the optimal extraction boundary that maximizes expected profitability per sublevel, taking into account preparation and production costs.

As a result, the tool provides three-dimensional visualizations of the model, heat maps of optimal boundaries, graphs of cumulative profit per floor, and a plan view by sublevel, which facilitates the design of sublevel mining contours. Its application was successfully validated in two test models, demonstrating its functionality and efficiency.

In conclusion, the optimizer developed meets the proposed objectives and represents a practical contribution to the underground mining planning process, allowing for a faster, clearer, and more structured technical-economic analysis from the early stages of the project.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	8
1.	Antecedentes	8
2.	Objetivo	8
2.1.	Objetivo general	8
2.2.	Objetivos específicos	8
II.	MARCO TEÓRICO	10
3.	Proceso manual para la Determinación del Borde Óptimo Económico	11
III.	DESARROLLO	12
4.	Metodología	12
4.1.	Estructurar diagrama de Flujo	13
4.2.	Definir variables de entrada	15
4.3.	Obtención de los bordes optimizado por barra	17
4.4.	Cálculo de valorización por borde	19
4.5.	Obtención de gráficas	20
4.6.	Análisis de diseño para cada subnivel	21
4.7.	Implementación de la interfaz gráfica de usuario	21
5.	Resultados	22
5.1.	Ingreso de parámetros iniciales	22
5.2.	Interfaz gráfica	23
5.3.	Primer Modelo	23
5.3.1.	Modelo	24
5.3.2.	Óptimos por barra	25
5.3.3.	Borde óptimo	25
5.3.4.	Beneficio en función del borde	26
5.3.5.	Diseño por subnivel	28
6.	Validación para la cota 1370	30
IV.	CONCLUSIONES	31
V.	REFERENCIAS	32
VI.	ANEXOS	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de etapas para determinar borde óptimo en Excel. _____	11
Figura 2: Metodología esquematizada para obtener un optimizador de borde económico. _____	13
Figura 3: Representación secuencial del proceso de codificación. _____	14
Figura 4: Representación de un bloque correspondiente al modelo. _____	15
Figura 5: Esquema de una barra de bloques (VNB: Valor Nueva Barra). _____	17
Figura 6: Representación barra de bloques con diferenciación de valores. _____	18
Figura 7: Ventana emergente para el registro del costo de preparación por barra. _____	22
Figura 8: Interfaz gráfica del optimizador. _____	23
Figura 9: Visualización tridimensional de los bloques positivos presentes en el modelo. _____	24
Figura 10: Visualización tridimensional de los bordes óptimos del modelo. _____	25
Figura 11: Vista de perfil de los bordes óptimos por barra en el modelo. _____	26
Figura 12: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo. _____	27
Figura 13: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo. _____	27
Figura 14: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo. _____	28
Figura 15: Ventana interactiva para la selección de la cota a estudiar. _____	29
Figura 16: Resultado del subnivel extraíble para la cota 1370. _____	29
Figura 17: Distribución referencial de los valores de cada bloque en la cota 1370. _____	30
Figura 18: Distribución de valores de la suma acumulada optimizada, considerando la suma desde derecha a izquierda. _____	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variables de entrada para el programa. _____	16
Tabla 2: Ejemplo del orden de las variables de entrada. _____	16
Tabla 3: Resumen del modelo. _____	24

GLOSARIO

SLC: Sublevel Caving

SUBLEVEL CAVING: Hundimiento por subniveles

VNB: Valor nueva barra

VB: Valor Bloque

US\$/BAR: Costo de preparación en dólares por cada barra a extraer

I. INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes

La minería subterránea es una técnica empleada para la extracción de minerales ubicados a profundidades donde no es viable aplicar métodos de minería a cielo abierto. Se estima que aproximadamente un 40% de las operaciones mineras mundiales corresponden a este tipo de explotación, en numerosos tipos de yacimientos y materias primas (O et al., 2021).

Dentro de la minería subterránea, los métodos de explotación se clasifican generalmente en tres categorías:

- Auto-soportados
- Artificialmente soportados
- No soportados

En esta última categoría se encuentra el método de hundimiento por subniveles (*Sublevel Caving*). Este método consiste en una extracción progresiva de arriba hacia abajo a través de distintos subniveles, provocando el colapso controlado del macizo rocoso superior para facilitar la recuperación del mineral objetivo.

El hundimiento por subniveles resulta útil cuando se cuenta con yacimiento emplazado en roca de buena calidad geomecánica y poco fracturada, con desarrollo subvertical y amplia potencia, en cuyo caso generalmente se descarta el hundimiento por socavación basal.

Para la planificación es necesaria la identificación del recurso de interés, ya que a partir de esta información se diseñan los niveles de explotación. Para lo cual en este trabajo se desarrolla una herramienta computacional para delimitar los bordes de explotación de cada subnivel bajo las restricciones propias del método de hundimiento por subniveles.

2. Objetivo

2.1. Objetivo general

Desarrollar un código Python que permita determinar el borde óptimo de los subniveles de un yacimiento explotado mediante el método de Sub Level Caving,

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un diagrama de flujo que represente de forma estructurada y lógica las etapas de desarrollo del código, desde la adquisición de datos hasta la visualización de resultados.

- Formular y programar un código Python que permita evaluar escenarios de borde, cuantificando el beneficio económico asociado a cada uno, y representar gráficamente la relación entre el beneficio y la posición del borde.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario que integre los resultados del análisis técnico-económico, facilitando la interpretación de los datos y la exploración interactiva de diferentes alternativas de explotación.

II. MARCO TEÓRICO

El hundimiento por subniveles (*Sublevel Caving*, SLC) es un método de minería subterránea empleado para la extracción masiva de minerales en depósitos de geometría subvertical. Este sistema se basa en la excavación progresiva por rebaje desde subniveles horizontales, donde se perfora, se detona y se extrae el mineral, permitiendo posteriormente el colapso progresivo del macizo rocoso suprayacente.

En comparación con otros métodos masivos, como el hundimiento por socavación basal, el SLC ofrece una selectividad relativamente mayor. No obstante, presenta como principal desventaja la dilución derivada del contacto inevitable entre el mineral tronado y el material estéril.

En la práctica, el SLC se desarrolla mediante subniveles de extracción en los que los túneles se disponen con un espaciamiento horizontal de entre 12 y 30 metros (medido desde el centro de cada túnel) y un espaciamiento vertical entre subniveles de 20 a 35 metros. El mineral objetivo se recupera desde el techo siguiendo el procedimiento descrito, generando una elipse de extracción sobre cada túnel. Esta elipse se define a partir de la malla de tronadura, buscando extraer el volumen planificado para cada subnivel antes de avanzar al siguiente.

Para este proyecto, y con el fin de simplificar la definición de bordes, se consideró la acumulación de bloques del techo en sentido horizontal como “barras” de mineral objetivo dentro de cada subnivel.

Desde una perspectiva de planificación minera subterránea, el enfoque óptimo del SLC debe establecerse en función del borde económico del yacimiento. Este corresponde a la zona límite en la que la extracción de mineral sigue siendo económicamente viable y depende de factores como:

- Ley y tonelaje del mineral contenido.
- Costos operacionales asociados a extracción, transporte y procesamiento.
- Recuperación estimada bajo condiciones reales de operación.

Una correcta definición del borde económico asegura la rentabilidad del proyecto y evita la extracción innecesaria de material no rentable. Para ello, es necesario integrar de forma sistemática y confiable variables técnicas y económicas.

3. Proceso manual para la Determinación del Borde Óptimo Económico

El proceso suele abordarse manualmente, a través de Excel. Lo habitual es:

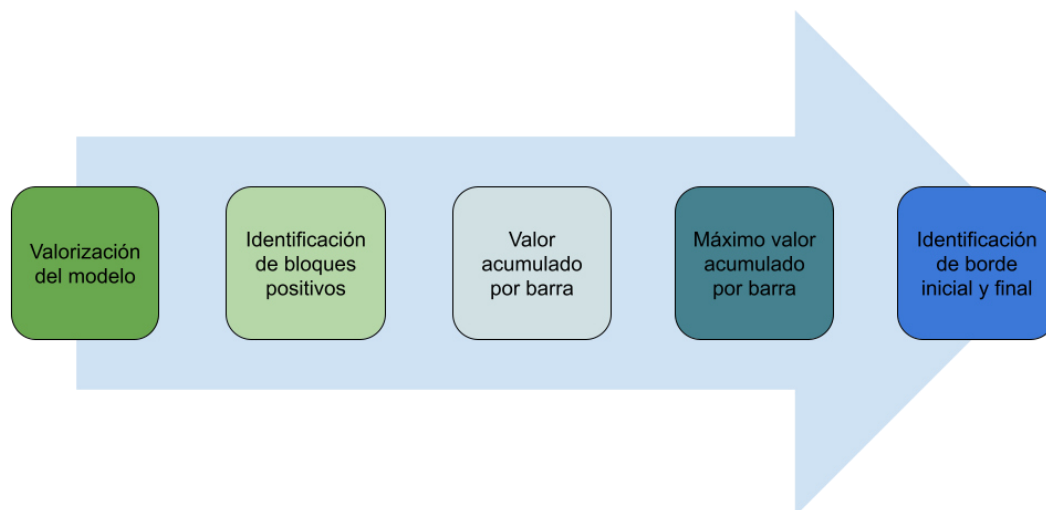


Figura 1: Esquema de etapas para determinar borde óptimo en Excel.

El esquema anterior resume las etapas que se deben llevar a cabo para identificar el borde óptimo de un yacimiento utilizando herramientas como Excel.

Cada unidad espacial dentro del modelo de bloques valorizado se caracteriza por un borde económico que determina la rentabilidad de la extracción. A medida que se acumulan los valores económicos de cada bloque, se obtiene una visualización de la distribución de valores por cada barra (facilitando asociar sus bordes), lo que permite generar un gráfico que muestra el beneficio total en relación con el borde económico. Este gráfico facilita la identificación del límite más rentable para la extracción, lo que define los bordes óptimos a partir de los cuales se maximiza el beneficio económico.

La flexibilidad de este enfoque permite ajustar el análisis a medida que cambian las condiciones del yacimiento, como fluctuaciones en los precios del mineral o modificaciones en los parámetros geotécnicos. A través de ajustes iterativos, se puede mantener un control detallado en cada fase del proyecto, lo cual es esencial para adaptarse a las variaciones que puedan surgir durante el desarrollo del trabajo minero.

III. DESARROLLO

Con el propósito de dar cumplimiento tanto al objetivo general como a los objetivos específicos planteados en este proyecto, se propone una metodología estructurada que permita la creación de una herramienta computacional capaz de determinar el borde económico óptimo de un yacimiento evaluado bajo el método de Sublevel Caving, utilizando el lenguaje de programación Python como base de desarrollo.

4. Metodología

La metodología propuesta se compone de tres etapas principales, diseñadas para guiar de forma lógica y progresiva el desarrollo del optimizador:

- Primera etapa: Diseño lógico. En esta fase se establece un diagrama de flujo de procesamiento de datos que define los pasos del proceso. A partir de este esquema general, se realiza un desglose detallado que facilita la programación posterior, definiendo claramente las variables de entrada necesarias (como coordenadas, valores económicos y características espaciales del modelo de bloques de ser necesario). Esta etapa tiene como finalidad generar una base clara para la programación del código computacional.
- Segunda etapa: desarrollo del núcleo del optimizador. Esta fase contempla la codificación de las funciones permiten analizar el modelo de bloques y calcular el valor económico acumulado por barra, lo que lleva a construir un gráfico de beneficio en función de los bordes considerados. A través de este proceso, se identifican los bordes de máxima rentabilidad, para la extracción mediante SLC.
- Tercera etapa: diseño de interfaz gráfica. Finalmente, se desarrolla una interfaz visual que integre los resultados obtenidos, permitiendo al usuario interactuar con la herramienta de manera iterativa hasta quedar conforme con el footprint correspondiente a cada subnivel. Esta visualización busca no solo simplificar el uso del optimizador, sino también facilitar la interpretación de los datos económicos, sirviendo como apoyo a la toma de decisiones en etapas tempranas de planificación minera.

Se muestra a continuación un diagrama que ilustra los pasos metodológicos propuestos con el fin de alcanzar los objetivos definidos al inicio del estudio:

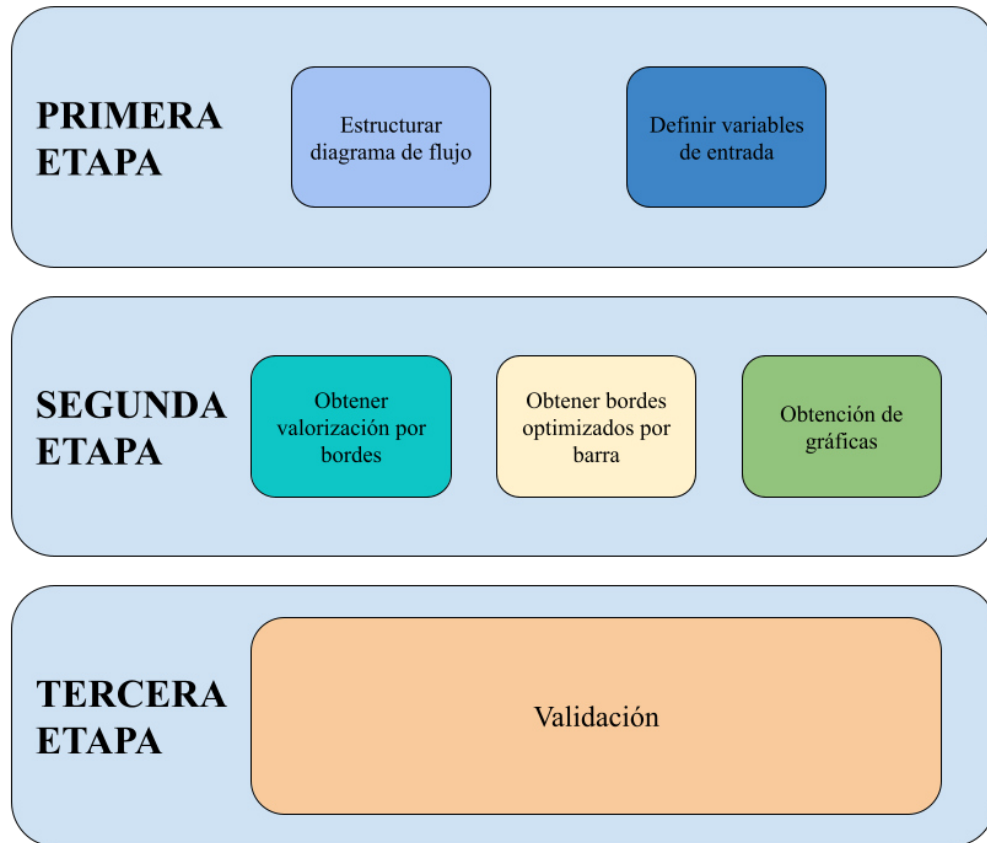


Figura 2: Metodología esquematizada para obtener un optimizador de borde económico.

4.1. Estructurar diagrama de Flujo

La elaboración de un diagrama de flujo representa en el desarrollo de herramientas computacionales un paso típico, ya que permite organizar de manera lógica y secuencial las acciones para alcanzar los objetivos definidos. En este caso particular, el diagrama actúa como una guía estructural para la programación, facilitando la comprensión global del proceso y sirviendo como base para la posterior codificación. Además, su construcción anticipa los requerimientos de entrada, las decisiones intermedias y los resultados esperados, permitiendo así una programación más eficiente y con menor margen de error.

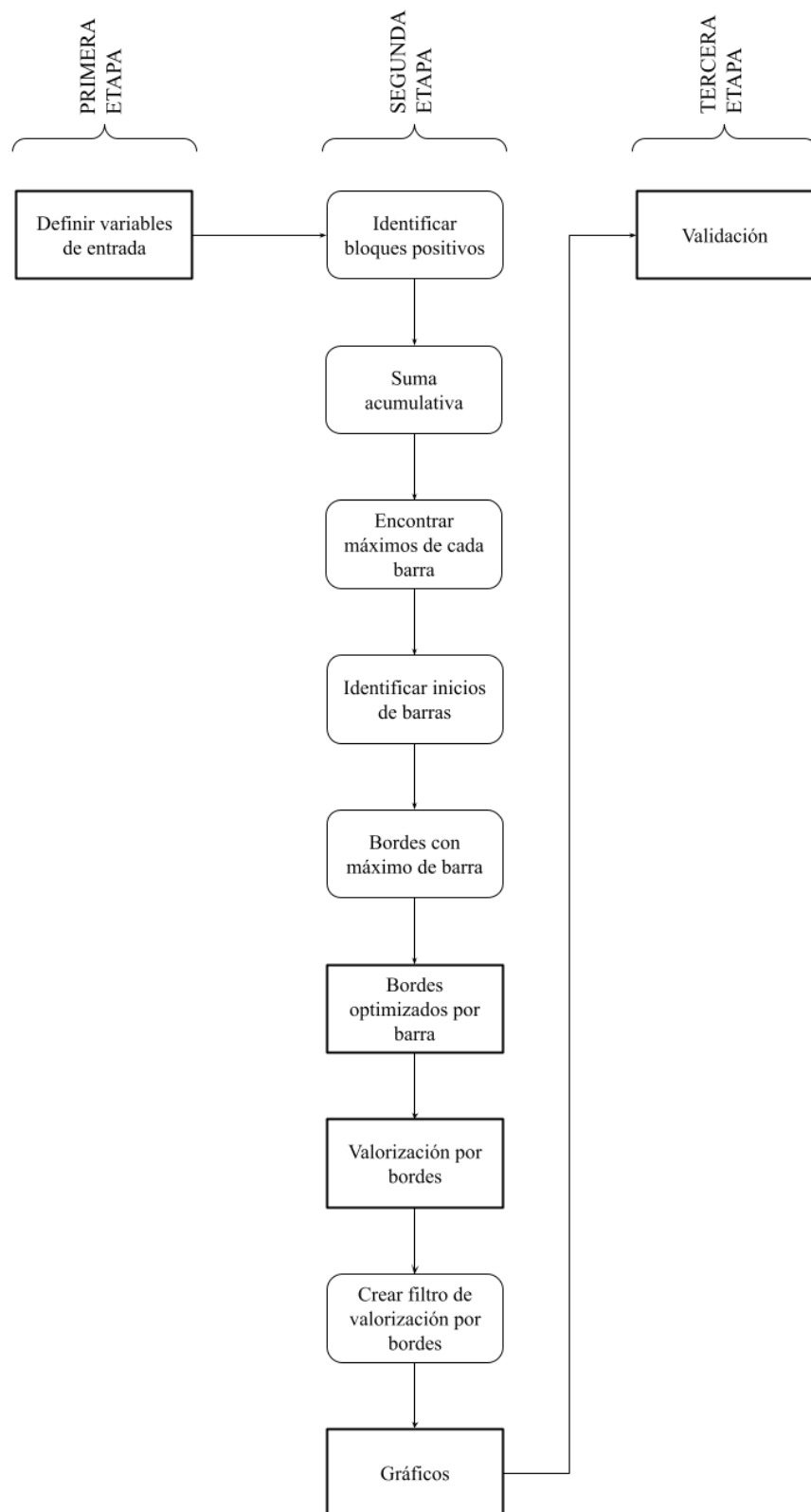


Figura 3: Representación secuencial del proceso de codificación.

4.2. Definir variables de entrada

Para la correcta implementación del algoritmo optimizador, se debe definir con claridad las variables que conformarán la base de datos inicial. Estas variables actuarán como insumos clave en el proceso de evaluación del borde económico óptimo del yacimiento modelado bajo el enfoque de minería por hundimiento de subniveles (SLC).

Dado que el objetivo central del presente trabajo es determinar, a partir de la valorización geoeconómica del yacimiento, el límite óptimo de extracción inicial, las variables espaciales deben estar correctamente estructuradas. Esto se debe a que cada modelo geológico puede corresponder a una geometría particular del depósito, por lo tanto, el análisis debe considerar su posición relativa en el espacio.

Las variables mínimas requeridas para la ejecución del análisis son:

- Coordenada Norte (Y)
- Coordenada Este (X)
- Cota (Z)

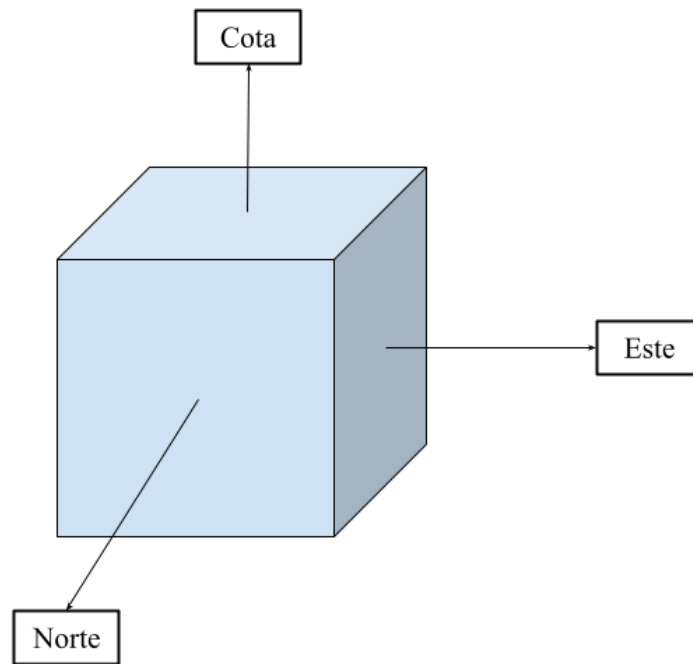


Figura 4: Representación de un bloque correspondiente al modelo.

A estas tres variables espaciales se suma una cuarta, correspondiente al valor económico del bloque, el cual debe estar previamente calculado e integrado en el modelo. Esta valorización representa el potencial económico asociado a cada unidad del yacimiento y resulta fundamental para discriminar entre zonas rentables y no rentables.

Tabla 1: Variables de entrada para el programa.

Variables de espacio			Variable de bloque valorizado
Este	Norte	Cota	VB

El orden que deben presentar las variables se distribuye de la siguiente manera:

- Cota: Descendente
- Norte: Ascendente
- Este: Descendente

Tabla 2: Ejemplo del orden de las variables de entrada.

Este	Norte	Cota	VB
510	380	1650	-77
490	380	1650	-77
470	380	1650	-77
450	380	1650	-77
430	380	1650	-77
410	380	1650	-77
390	380	1650	-77

Las variables antes descritas deben ser suministradas mediante una base de datos con formato estandarizado. Esta base de datos debe denominarse “Modelo”, tener la extensión “.csv”, y emplear como delimitador el carácter punto y coma (“;”), lo cual facilita su lectura desde entornos de programación como Python.

Adicionalmente, se requiere el ingreso de una quinta variable esencial para la evaluación económica: el costo de preparación por barra, expresado en US\$/Barra. Este valor se calcula a partir del costo unitario por metro cuadrado de preparación (US\$/m²) y el área efectiva de cada barra, cuya geometría depende de las dimensiones del modelo de bloques.

Dado que este parámetro puede variar de un yacimiento a otro, se integrará una interfaz gráfica emergente dentro del sistema que permitirá al usuario ingresar este dato de forma personalizada. Esta funcionalidad no solo entrega flexibilidad, sino que también asegura que el análisis económico se adapte a las condiciones reales de cada escenario evaluado.

El desarrollo técnico de esta ventana gráfica, así como su integración en el flujo del optimizador, se detalla en el Anexo 1.

Con todas las variables necesarias correctamente definidas e integradas, se encuentra preparado el entorno para dar paso a la implementación del núcleo del optimizador.

4.3 Obtención de los bordes optimizado por barra

Esta etapa de la metodología se centra en la implementación del código en el lenguaje Python, con el objetivo de identificar el borde económico óptimo dentro del modelo valorizado. El proceso se basa en analizar barras horizontales de bloques y determinar hasta qué cota resulta económicamente viable su extracción.

Paso 1: El primer paso consiste en establecer un sistema de agrupación que permita distinguir cada barra presente en el modelo. Para ello, se crea una nueva variable denominada "Nueva barra", que asigna un valor único a los bloques que comparten la misma coordenada Cota y Norte.

Una vez agrupados, se asigna una etiqueta adicional para distinguir el bloque inicial de cada barra, es decir, aquel ubicado en el borde más largo (profundo), marcándolo con el valor 1, mientras que los bloques restantes que se ubican por antes en la misma barra reciben el valor 0. Este procedimiento ayuda a permitir una acumulación ordenada de los valores por barra en etapas posteriores del análisis.

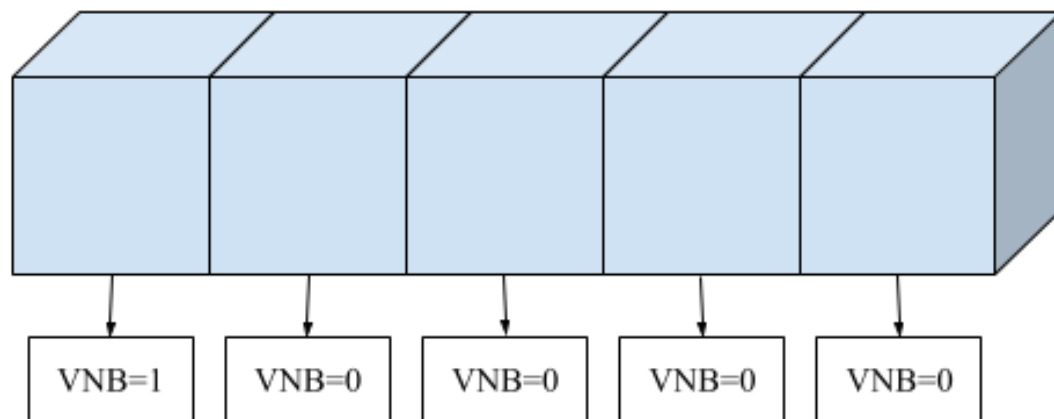


Figura 5: Esquema de una barra de bloques (VNB: Valor Nueva Barra).

La elaboración del código necesario para asignar los valores previamente mencionados se encuentra detallada en el Anexo 2.

Paso 2: El segundo paso consiste en determinar la ubicación horizontal de aquellos bloques que aportan valor económico al proyecto. Para ello, se introduce una nueva variable denominada "Este Positivo", cuya función es identificar únicamente los bordes correspondientes a bloques con valor económico mayor a cero.

Esta variable se genera mediante una función condicional que, al evaluar cada bloque, asigna su Este real si el valor económico asociado es positivo. En caso contrario, el valor asignado será 0, descartando así aquellos bloques sin aporte económico al cálculo del borde óptimo.

Esta distinción preliminar permite acotar el análisis únicamente a aquellos segmentos del yacimiento que justifican económicamente su extracción, facilitando el posterior proceso de acumulación y comparación de valor total por barra.

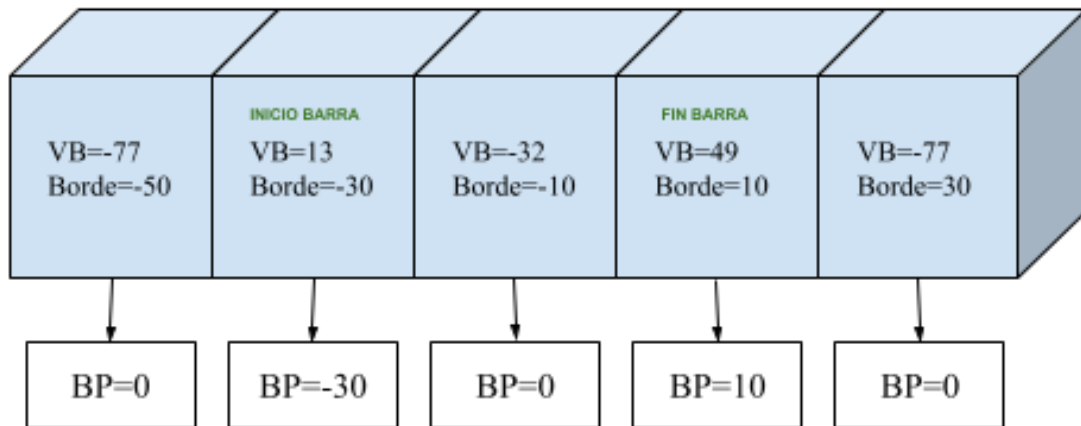


Figura 6: Representación barra de bloques con diferenciación de valores.

Según lo señalado previamente, y para llevar a cabo la implementación, se utilizará el código presentado en el Anexo 3.

Paso 3: La tercera etapa de la metodología contempla la creación de una nueva variable denominada "Suma Acum", la cual tiene por objetivo calcular el valor acumulado de todos los bloques presentes bajo cada punto del modelo, dentro de una misma barra vertical.

A diferencia del paso anterior, esta sumatoria considera tanto bloques con valor positivo como negativo, reflejando así el efecto económico real de incluir bloques estériles o marginales en la extracción. La acumulación sigue un ascendente, en dirección al este, replicando la lógica secuencial con que ocurre la extracción en minería por Sublevel Caving.

Esta operación permite la posterior identificación del borde óptimo, ya que permite establecer, para cada posición vertical, el valor neto que se obtendría extrayendo desde ese punto hacia abajo.

El código correspondiente que implementa esta funcionalidad puede consultarse en el Anexo 4.

Paso 4: En esta etapa se implementa la variable denominada "Índice optimizador", cuya función es señalar el borde horizontal dentro de cada barra en la que se alcanza el valor económico acumulado máximo. Esta identificación permite determinar el punto óptimo desde el cual convendría finalizar la extracción de la barra, considerando el rendimiento económico total que se obtendría hasta ese borde desde el borde inicial determinado por los bloques positivos.

Para llevar a cabo esta tarea, se aplicó un procedimiento en dos fases:

1. Cálculo de máximos por barra: Se genera una lista que contiene, para cada barra, el mayor valor acumulado obtenido en la variable "Suma Acum" definida en el paso anterior.
2. Generación del índice: Se compara cada valor de la barra con su correspondiente máximo. Si coincide, se asigna un valor de 1 en la variable "Índice optimizador"; en caso contrario, se asigna un 0.

Este índice actúa como marcador para la posterior selección del borde económico óptimo en el modelo completo.

El código que implementa este procedimiento puede revisarse en el Anexo 5.

Paso 5: La quinta etapa contempla la creación de una nueva variable denominada “Valor óptimo”, la cual tiene como propósito determinar el beneficio económico neto asociado a cada barra del modelo. Para ello, se calcula la diferencia entre el valor máximo acumulado previamente identificado (obtenido en el Paso 4) y el costo de preparación correspondiente a cada barra.

Este costo es ingresado por el usuario al momento de ejecutar el optimizador, a través de la interfaz gráfica desarrollada para tal efecto, y se expresa en unidades de US\$/Barra. La inclusión de este parámetro permite obtener una estimación más realista del rendimiento económico, descontando los costos fijos asociados a la preparación.

El código utilizado para implementar esta operación puede consultarse en el Anexo 6.

Paso 6: En esta última etapa, se procede a generar una nueva variable denominada “Borde óptimo”, cuya finalidad es registrar el borde a la que se encuentra ubicado el valor económico neto máximo en cada barra. Este borde representa el punto en el que, de realizar una extracción selectiva desde ese punto, se alcanzaría la mayor rentabilidad esperada, considerando los costos de preparación.

La implementación de esta función se basa en los resultados obtenidos en los pasos anteriores, y permite consolidar la información clave para definir preliminarmente el diseño de extracción bajo el enfoque de Sublevel Caving.

El código asociado a esta etapa se presenta en el Anexo 7.

4.4 Cálculo de valorización por borde

Habiendo identificado el borde económico óptimo individual para cada barra dentro del modelo, es necesario consolidar estos resultados para obtener una evaluación global del yacimiento. Para ello, se implementa un filtro que agrupa y suma los valores económicos

netos según el borde en el que se sitúan, generando así una valorización acumulada por borde.

Este procedimiento permite estimar el beneficio total que se alcanzaría si se definiera un único borde como límite de extracción económica, considerando el aporte de todas las barras cuyo punto óptimo se encuentra en dicho nivel. El objetivo de este análisis es determinar el borde económico global óptimo, que maximiza la rentabilidad del yacimiento bajo una estrategia simplificada de explotación tipo SLC.

Es importante señalar que, hasta esta etapa, la metodología considera la optimización de un único borde común para todo el depósito (óptimo matemático). Esta simplificación resulta particularmente útil en etapas preliminares de evaluación técnica y económica, donde se busca comprender el potencial extractivo sin involucrar aún el detalle del diseño minero.

El desarrollo del código que implementa este cálculo se encuentra disponible en el Anexo 8.

4.5 Obtención de gráficas

La etapa final del proceso metodológico implementado en esta fase corresponde a la visualización gráfica de los resultados obtenidos. Esta visualización cumple con facilitar la interpretación de los datos procesados, permitiendo analizar el comportamiento económico del modelo según el borde considerado, así como observar la distribución espacial de los bloques con valor positivo.

A continuación, se describen los gráficos generados:

a) Modelo de bloques con beneficio positivo.

Este gráfico tridimensional muestra exclusivamente los bloques que presentan un valor económico neto positivo. El objetivo es resaltar el cuerpo mineralizado económicamente rentable, proporcionando una vista espacial clara de las zonas de interés dentro del yacimiento.

b) Visualización tridimensional del borde óptimo por barra.

Este gráfico presenta, también en vista tridimensional, la ubicación espacial del borde económico óptimo determinado para cada barra del modelo. Esta visualización permite evaluar la morfología general del límite económico preliminar del yacimiento bajo condiciones simplificadas.

c) Representación térmica del borde óptimo.

Se genera un gráfico bidimensional tipo mapa de calor, en el que se muestra la ubicación del borde óptimo por barra mediante un gradiente de color. Este gráfico facilita la identificación de patrones espaciales en la distribución del borde económico, como tendencias estructurales o zonificación económica.

d) Gráfico de beneficio acumulado en función del borde.

Esta visualización, en dos dimensiones, presenta el beneficio económico acumulado en función del borde común definido. El eje horizontal representa la profundidad del borde, mientras que el eje vertical corresponde al beneficio económico total. Este gráfico permite identificar el borde global óptimo del yacimiento, es decir, el nivel en el que se maximiza la rentabilidad bajo el enfoque aplicado.

El código empleado para generar estas visualizaciones se encuentra detallado en el Anexo 9.

4.6 Análisis de diseño para cada subnivel

Una vez obtenidos todos los datos económicos, se incorpora una visualización por cota para cada subnivel, con el objetivo de facilitar el diseño de los túneles de extracción. Para ello, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario especialmente diseñada para esta función, que permite seleccionar una cota específica y visualizar los bloques económicamente rentables en dicho nivel. Esta herramienta busca apoyar la toma de decisiones durante la planificación y montaje de la malla de extracción del yacimiento.

El código fuente correspondiente a esta interfaz gráfica se encuentra disponible en el Anexo 10.

4.7 Implementación de la interfaz gráfica de usuario

La incorporación de una interfaz gráfica constituye un elemento clave para consolidar y facilitar la interacción con la herramienta desarrollada. Esta interfaz actúa como un punto de control centralizado, permitiendo al usuario acceder y visualizar los resultados generados en cada etapa del proceso de optimización, sin necesidad de interactuar directamente con el código.

Con el objetivo de asegurar una experiencia de uso intuitiva, la interfaz ha sido diseñada con una estructura funcional y minimalista, incorporando botones que permiten acceder

de forma directa a las visualizaciones y resultados obtenidos previamente, tales como los gráficos tridimensionales, los datos del borde óptimo y los parámetros de entrada.

De esta forma, se mejora significativamente la usabilidad del optimizador, facilitando su aplicación en entornos operativos y académicos donde se requiere agilidad en la interpretación de resultados.

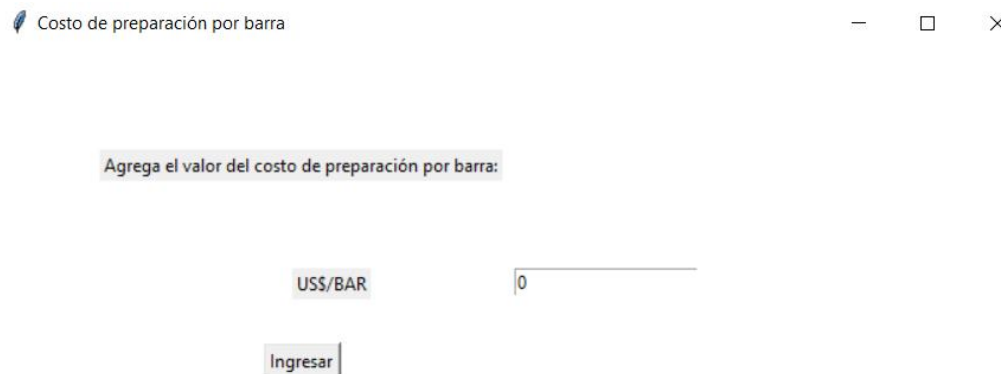
El código fuente correspondiente a esta interfaz gráfica se encuentra disponible en el Anexo 11.

5. Resultados

Con el objetivo de verificar la funcionalidad del código desarrollado, se presentan los resultados obtenidos a partir de su aplicación en dos modelos de bloques de prueba: uno con una cantidad reducida de bloques y otro con una cantidad considerablemente mayor. Esta comparación permite validar que el código opera correctamente con independencia del tamaño del modelo.

5.1. Ingreso de parámetros iniciales

A continuación, se muestra la ventana emergente diseñada para el ingreso del costo de preparación por barra. Tal como se indica en la figura, este valor debe ser introducido utilizando las unidades correspondientes (US\$/BAR). Posteriormente, se debe presionar el botón “Ingresar” para que el optimizador registre el parámetro y pueda continuar con el cálculo del borde óptimo.



The image shows a modal window with the title "Costo de preparación por barra". Inside the window, there is a text prompt "Agrega el valor del costo de preparación por barra:". Below this, there is a label "US\$/BAR" and a text input field containing the number "0". At the bottom of the window, there is a button labeled "Ingresar". The window has standard window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

Figura 7: Ventana emergente para el registro del costo de preparación por barra.

5.2. Interfaz gráfica

En consiguiente, se presenta la interfaz gráfica desarrollada para gestionar el optimizador de bordes óptimos. En el centro de la interfaz se encuentra un visualizador, el cual muestra los gráficos de beneficio en función del borde al presionar los botones ubicados en el sector derecho de la ventana. Por su parte, los botones situados en el lado izquierdo despliegan ventanas emergentes que contienen información complementaria.

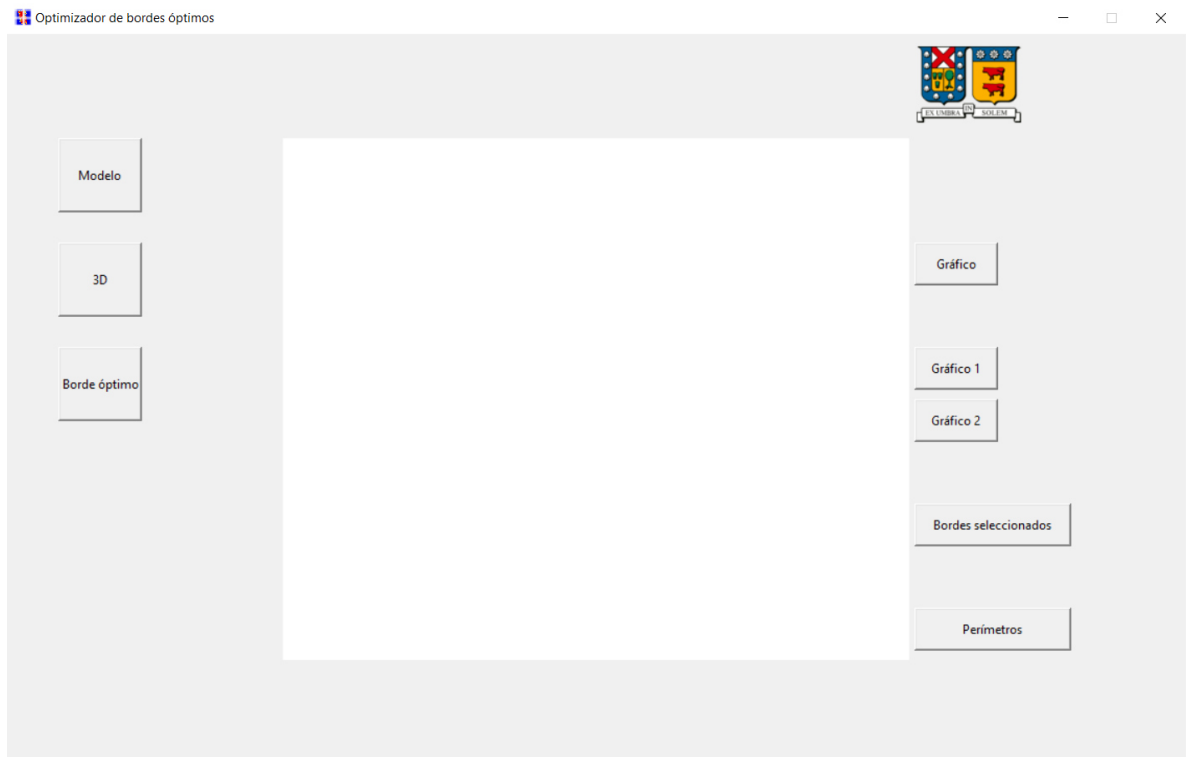


Figura 8: Interfaz gráfica del optimizador.

5.3. Primer Modelo

Tal como se indicó previamente, la validación del optimizador de piso óptimo se realizará mediante su aplicación en dos modelos distintos, con el propósito de evaluar su desempeño y funcionalidad. A continuación, se describen las características del primer modelo:

Tabla 3: Resumen del modelo.

N° de bloques 22.275		
Coord.	Mín.	Máx.
Este	-130	510
Norte	380	900
Cota	1170	1650

5.3.1. Modelo

A continuación, se muestra una vista tridimensional de los bloques del modelo que presentan un beneficio positivo. Esta visualización se puede activar mediante la selección del botón denominado “Modelo”, ubicado en el panel izquierdo de la ventana gráfica.

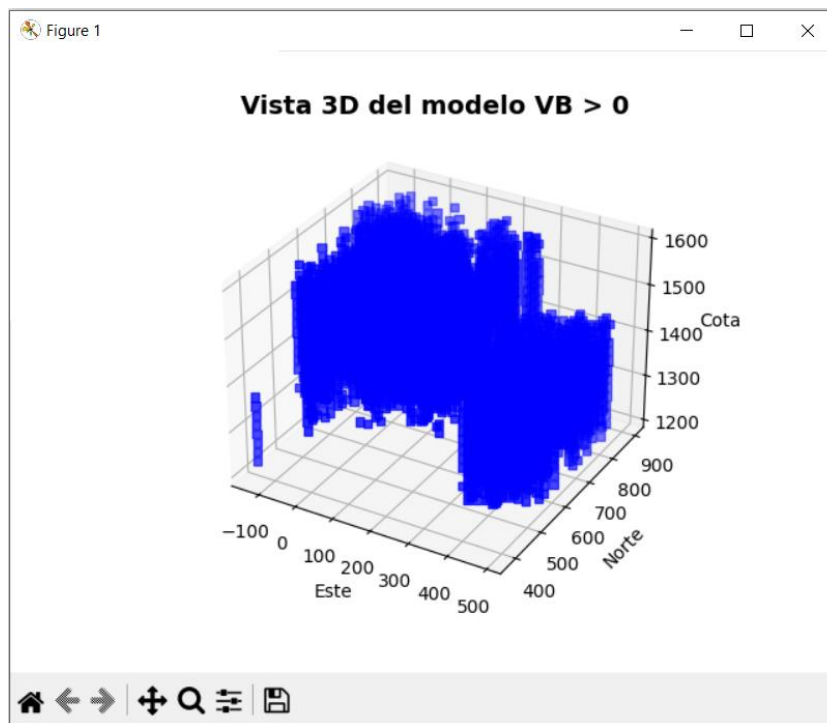


Figura 9: Visualización tridimensional de los bloques positivos presentes en el modelo.

5.3.2. Óptimos por barra

El siguiente gráfico tridimensional representa el punto óptimo correspondiente a cada barra del modelo. Para acceder a esta visualización, debe presionarse el botón denominado “3D”.

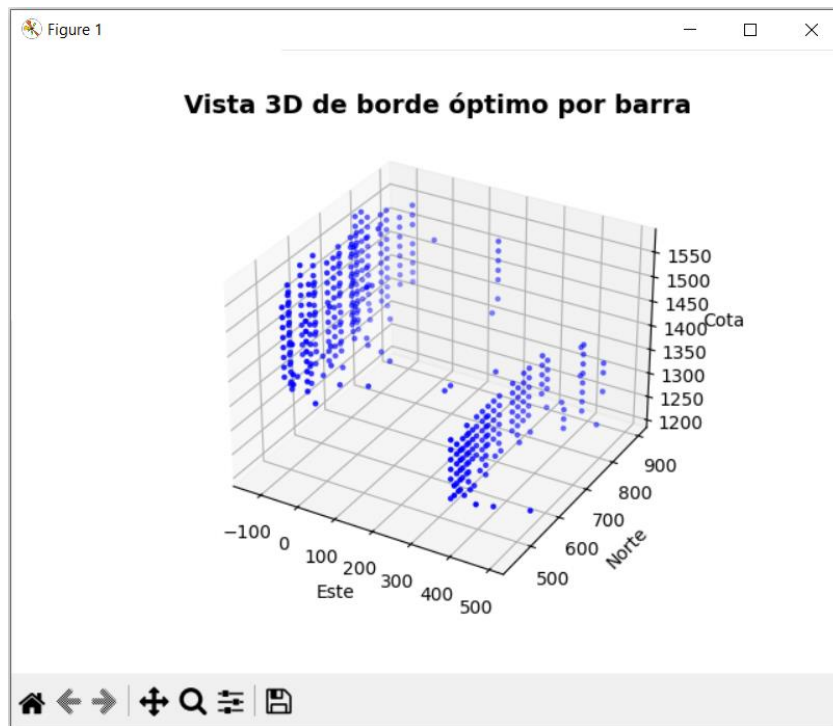


Figura 10: Visualización tridimensional de los bordes óptimos del modelo.

5.3.3. Borde óptimo

En la figura siguiente se presenta una gráfica bidimensional con un gradiente de color que proporciona información sobre la coordenada Este en el que se encuentra el borde óptimo de cada barra del modelo analizado. Para visualizar esta gráfica, debe presionarse el botón denominado “Borde óptimo”.

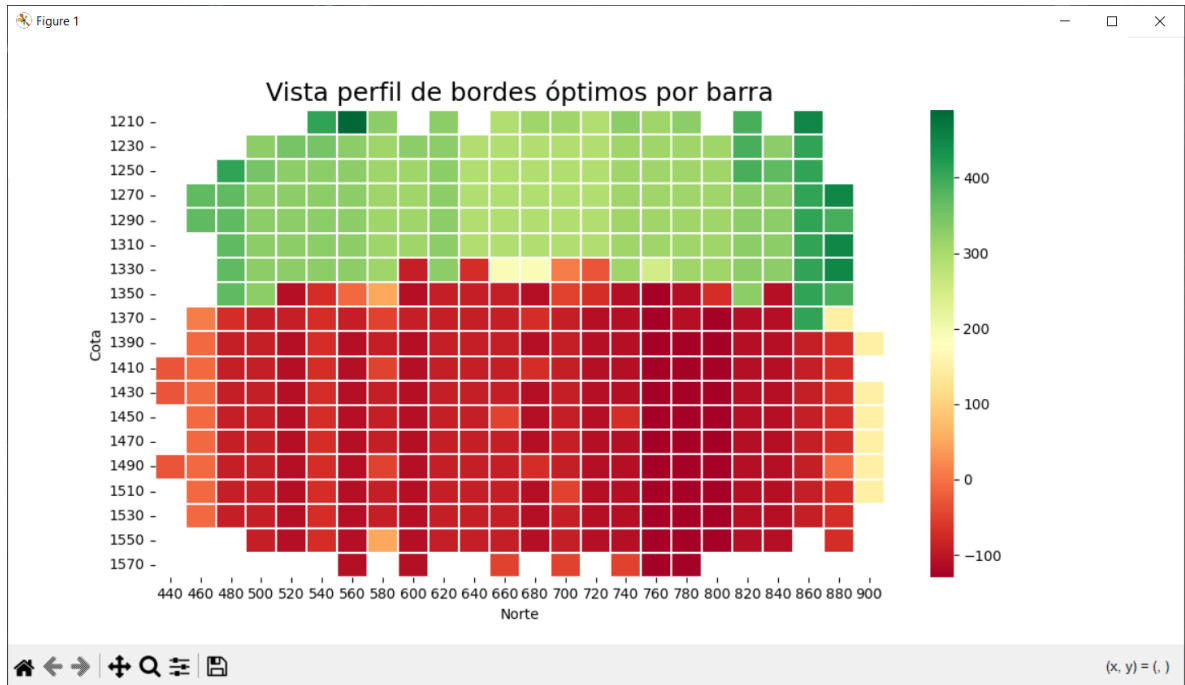


Figura 11: Vista de perfil de los bordes óptimos por barra en el modelo.

5.3.4. Beneficio en función del borde

Con el objetivo de maximizar el beneficio económico del yacimiento, se llevó a cabo una evaluación considerando dos escenarios distintos.

En el primer escenario, se analiza el rendimiento económico del yacimiento a partir de una única zona de extracción, definida según el borde óptimo. Para ello, se genera una única gráfica que representa los beneficios en función del piso.

El segundo escenario contempla la creación de dos zonas de extracción óptimas, obteniéndose una gráfica independiente para cada una.

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a la evaluación de ambos escenarios.

a) Zona de excavación única

La gráfica resultante de la evaluación del yacimiento, bajo el supuesto de una única zona de extracción óptima, se presenta en la figura siguiente.

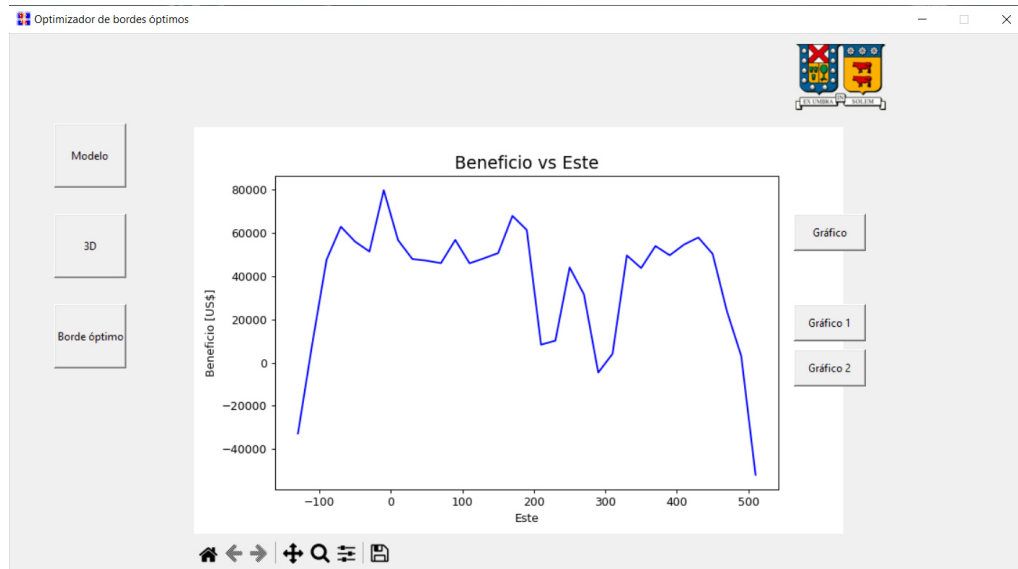


Figura 12: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo.

Como puede observarse, la gráfica representa el beneficio bruto asociado a cada borde en la coordenada Este del modelo. Se identifican una zona destacada de rentabilidad, la cual se extiende entre las coordenadas Este -50 y 490, poseyendo un beneficio total aproximado de 1,9 millones de USD.

b) Sectores de excavación múltiple

A continuación, se realiza la evaluación del yacimiento considerando dos sectores de excavación óptimos, a partir de la cual se obtienen las siguientes cifras.

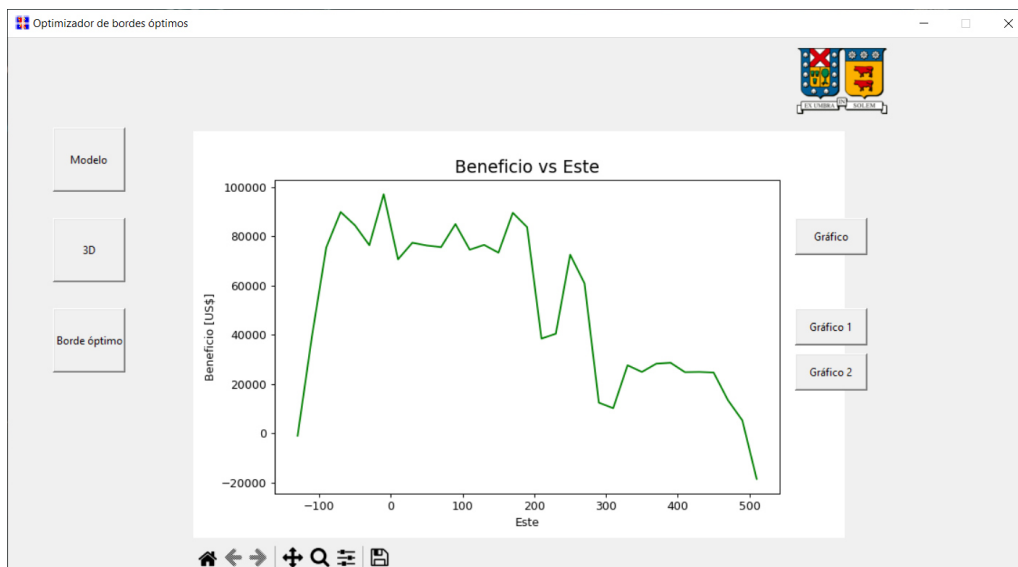


Figura 13: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo.

La figura anterior permite observar con mayor claridad que la primera zona de excavación concentra un beneficio significativo entre las coordenadas Este -70 y 270, con un valor estimado en aproximadamente 1,1 millones de USD.

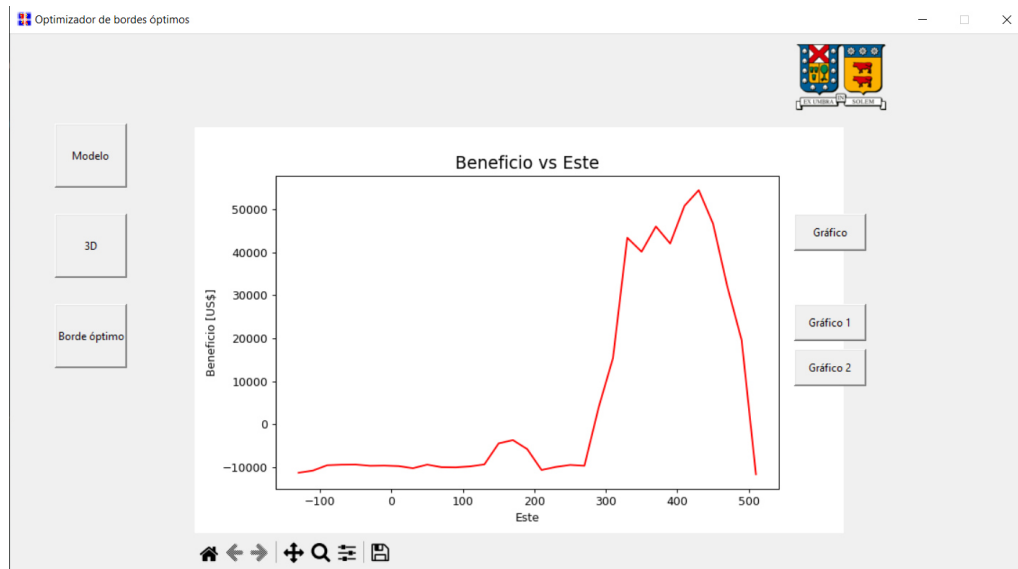


Figura 14: Gráfica beneficio vs coordenada Este del modelo.

En este caso, la gráfica permite observar un incremento significativo en el beneficio correspondiente a la zona comprendida entre las coordenadas Este 310 y 490, lo que representa un valor estimado de aproximadamente 690 mil USD.

5.3.5. Diseño por subnivel

Para un diseño preciso de la malla de extracción y de los túneles asociados, el modelo permite analizar libremente cada cota mediante una vista en planta, lo que facilita la identificación de bloques con rentabilidad asegurada. Esta funcionalidad se implementa a través de dos ventanas interactivas, activadas mediante el botón “Perímetros”, tras lo cual el usuario puede seleccionar la cota que desea visualizar. El sistema genera un gráfico en tiempo real, proporcionando así una herramienta dinámica para apoyar el diseño del yacimiento.

Perímetros según cota

1370

Confirmar

Figura 15: Ventana interactiva para la selección de la cota a estudiar.

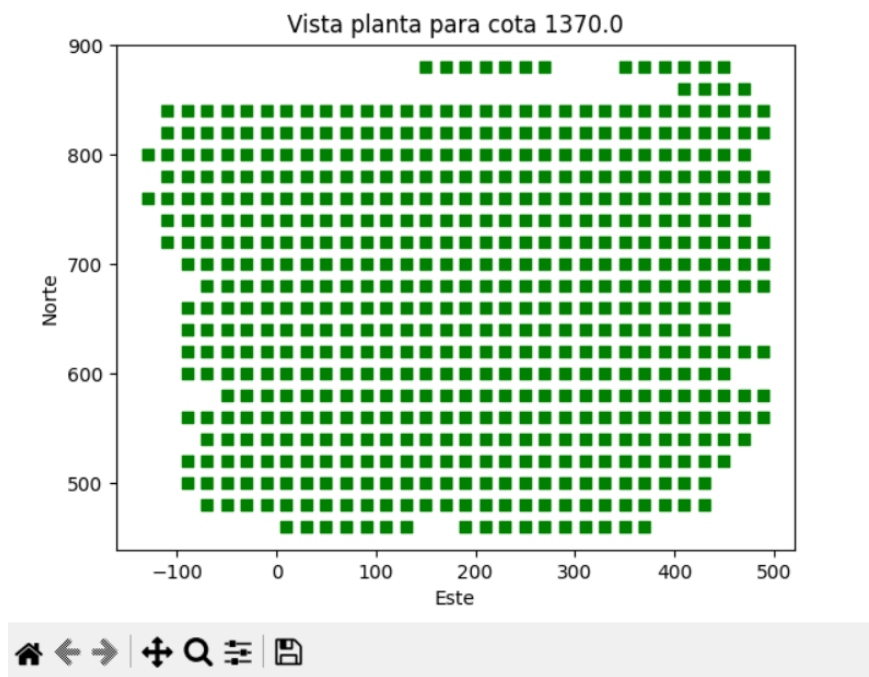


Figura 16: Resultado del subnivel extraíble para la cota 1370.

En la Figura 15, se puede apreciar la ventana interactiva, la cual posee un menú desplegable para la selección de la cota, a lo que posteriormente a confirmar su selección, se nos entregará como resultado un gráfico tal como el de la Figura 16.

6. Validación para la cota 1370

Realizando un análisis en Excel para comparar los resultados correspondientes a la cota 1370, se obtuvo inicialmente lo siguiente:

Etiquetas de fila	T	-130	-110	-90	-70	-50	-30	-10	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510	
860		-77	-77	174	24	24	-77	224	-77	-77	257	-77	-43	-77	-77	-77	124	-9	-77	-77	-77	57	224	-77	-77	-77	-77	-77	-77	224	523	24	224	-77	-77
840		-77	74	-26	523	24	473	224	-77	473	-77	-9	-9	-77	-77	124	-77	-77	-77	-77	1123	-77	1023	224	523	723	823	1123	324	-77	-77	-77	-77	-77	
820		-77	124	290	473	174	57	257	-77	-77	-77	-77	-77	-77	-77	-77	-9	-26	-77	-77	124	-77	-77	923	523	-77	324	523	24	424	523	424	-77	-77	
800		274	424	174	224	257	157	24	224	324	-77	-26	324	-77	-77	-77	74	157	-77	-77	-77	324	-77	1123	523	723	823	623	523	324	523	-77	-77	-77	
780		-26	290	174	74	57	290	91	24	24	-26	257	473	24	91	324	57	424	-77	-77	24	473	-77	723	823	324	24	523	324	523	424	923	523	-77	
760		24	324	324	374	224	24	-26	-9	473	174	57	224	290	224	-9	174	-77	-77	-77	190	224	24	523	424	823	1123	1023	124	24	1023	324	523	-77	
740		-77	473	-77	224	-9	224	24	-26	424	224	224	24	57	174	324	424	-77	-77	57	24	124	-77	24	523	623	523	523	24	523	424	124	-77	-77	
720		-77	24	124	174	-9	-26	91	24	124	57	324	91	224	-43	324	424	257	-77	473	257	-77	523	523	1023	124	1123	1123	823	1123	623	623	1023	-77	
700		-77	-77	91	-77	74	157	124	24	124	-26	24	124	91	290	-26	424	324	-77	-43	124	-77	1023	723	124	1123	24	923	24	24	1023	124	124	-77	
680		-77	57	-77	124	190	-77	-26	424	-9	-9	24	224	224	24	-77	-43	224	24	324	224	290	224	124	923	823	723	723	923	823	623	-77	-77	-77	
660		-77	-77	224	-77	-9	124	473	-43	190	-26	24	274	274	74	-9	224	24	74	224	157	-9	923	1123	1123	723	523	1123	523	523	324	-77	-77	-77	
640		-77	-77	124	473	324	374	274	-77	523	324	224	24	-9	190	224	-9	24	324	473	-77	224	523	424	24	723	424	623	24	523	523	-77	-77	-77	
620		-77	-77	224	473	224	324	-77	24	-43	424	57	124	424	274	324	124	91	-43	-77	324	274	-77	424	1123	723	823	723	823	224	823	224	124	-77	
600		-77	-26	24	57	74	74	190	174	190	374	57	24	190	424	157	257	124	374	-77	190	-77	424	623	523	923	1123	1123	324	-77	-77	-77	-77	-77	
580		-77	-77	74	-77	124	174	-77	-77	-77	473	190	-9	424	257	257	224	424	174	324	424	-77	723	923	424	723	523	723	523	723	1023	1023	-77	-77	
560		-77	-43	190	74	-77	-77	-43	24	224	324	-77	374	24	57	274	274	424	274	274	124	473	-77	24	823	124	124	1123	224	723	324	1123	-77	-77	
540		-77	-77	324	324	224	274	290	174	290	24	-77	473	224	-9	274	523	124	-77	324	-77	-77	-77	1123	324	1123	1023	723	24	324	723	-77	-77	-77	
520		-77	-26	324	24	224	-77	-26	324	24	190	74	523	-77	224	473	374	424	174	157	224	-77	-77	923	523	224	24	1023	1023	523	-77	-77	-77	-77	
500		-77	-77	374	224	-43	91	-77	-9	-77	-77	-77	-77	174	124	-77	-77	-77	190	-77	-26	-77	-77	224	723	224	1123	1123	124	-77	-77	-77	-77	-77	
480		-77	-77	-43	190	-77	523	224	-77	-77	-77	-77	57	124	24	-77	-77	-77	274	-77	324	-77	-77	-77	-77	-77	-77	24	-77	424	623	-77	-77	-77	-77

Figura 17: Distribución referencial de los valores de cada bloque en la cota 1370.

Este resultado permite identificar, en primera instancia, la ubicación del valor máximo posible para este nivel. Al comparar estos datos con el resultado presentado en la Figura 16, se observa que el programa considera incluso bloques que, en principio, podrían clasificarse como no rentables. Sin embargo, la extracción de dichos bloques facilita la extracción de otros que, en conjunto, incrementan significativamente el valor acumulado de esta “barra horizontal” de mineral.

En otras palabras, al considerar la suma de valores con el objetivo de maximizar el valor extraído en este nivel, se obtiene una distribución como la siguiente:

Etiquetas de fila	T	-130	-110	-90	-70	-50	-30	-10	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350	370	390	410	430	450	470	490	510
860		742	819	896	722	698	674	751	527	604	681	424	501	544	621	698	775	651	660	737	814	891	834	610	687	764	841	918	995	771	248	224	0	0
840		7314	7991	7171	7443	6820	6798	6321	6089	6176	5701	5740	5788	5798	5875	5952	5428	5905	5982	6059	6136	6211	6058	5712	5809	4886	4703	3740	3516	2993	2270	1447	184	0
820		4298	4375	4251	3961	3488	3314	3257	3000	3077	3154	3231	3007	3084	3161	3238	3315	3324	3350	3427	3504	3380	3457	3534	3611	2688	2105	2242	1918	1395	1371	947	428	0
800		8127	7853	7429	7255	7031	6774	6617	6593	6369	6045	6122	6148	5824	5801	5978	6055	5981	5824	5901	5978	6055	5731	5808	4685	4162	3439	2616	1993	1370	847	523	0	
780		8022	8048	7758	7584	7510	7453	7163	7072	7048	7024	7050	6793	6320	6296	6205	5881	5824	5400	5477	5554	5503	5057	5134	4411	3588	3264	3240	2717	2393	1870	1446	523	0
760		9007	8963	8659	8135	7961	7737	7713	7739	7748	7275	7101	7044	6820	6530	6306	6315	6141	6218	6295	6372	6182	5958	5934	5411	4987	4164	3041	2018	1894	1870	847	523	0
740		5916	5993	5520	5507	5373	5382	5158	5134	5160	4736	4512	4288	4264	4207	4033	3709	3285	3362	3439	3382	3358	3234	3111	3287	2764	2141	1618	1095	1071	548	124	0	
720		11337	12444	11390	11186	11092	11101	11127	11036	11012	10888	10831	10507	10416	10192	10235	9911	9487	9230	9307	8834	8577	8654	8131	7608	6585	6461	5338	4215	3392	2269	1646	1098	0
700		6774	6851	6928	6837	6914	6840	6683	6559	6535	6411	6437	6413	6289	6138	5908	5934	5510	5186	5263	5306	5182	5259	4236	3513	3389	2266	2242	1319	1295	1271	248	124	0
680		8038	8115	8058	8135	8011	7821	7898	7924	7500	7509	7518	7494	7270	7046	7022	7099	7142	6918	6894	6570	6346	6056	5832	5708	4785	3962	3239	2516	1593	770	147	224	0
660		8941	9018	9095	8871	8948	8957	8833	8360	8403	8213	8239	8215	7941	7667	7593	7602	7378	7354	7280	7056	6899	6908	5985	4862	3739	3016	2493	1370	847	523	0	0	
640		7608	7685	7762	7638	7165	6841	6467	6193	6270	5747	5423	5199	5175	5184	4994	4770	4779	4755	4431	3958	4035	3811	3288	2864	2840	2117	1693	1070	1046	523	0	0	
620		8372	8449	8526	8302	7829	7605	7281	7358	7314	7377	6953	6896	6772	6348	6074	5750	5626	5535	5378	5655	5331	5057	5134	5211	4787	3664	2941	2118	1395	1171	588	124	0
600		8206	8283	8360	8136	8228	8154	8080	7890	7716	7526	7152	7095	7071	6881	6457	6300	6043	5919	5545	5422	5432	5509	5586	5162	4539	4016	3493	2570	1447	523	0	0	
580		10249	10326	10403	10329	10406	10382	10108	10185	10262	10139	9866	9676	9685	9261	9004	8747	8523	8099	7925	7601	7177	7254	7331	6608	5685	5261	4538	4015	3292	2269	1646	1098	0
560		7472	7549	7592	7402	7328	7405	7482	7525	7501	7277	6953	7030	6656	6632	6575	6301	6027	5603	5329	5055	4931	4458	4535	4612	4588	3765	3641	3517	2394	2170	1447	1123	0
540		8628	8705	8782	8859	8535	8211	7987	7713	7423	7249	6959	6935	7012	6539	6315	6324	6050	5527	5403	5480	5156	5233	5310	5387	4264	3940	2817	1794	1071	1047	723	0	0
520		7805	7882	7908	7584	7560	7336	7413	7439	7115	7091	6901	6827	6304	6381	6157	5684	5310	4886	4712	4535	4331	4408	4485	4562	3639	3116	2593	2569	1546	523	0	0	
500		3562	3639	3716	3342	3118	3161	3070	3147	3156	3233	3110	3387	3464	3290	3166	3243	3120	3397	3474	3284	3361	3387	3464	3541	3317	2594	2370	1247	124	0	0	0	
480		1459	1536	1613	1456	1466	1543	1020	796	873	950	1027	1104	1047	923	809	976	1053	1130	836	933	609	686	763	840	917	894	970	1047	628	0	0	0	

IV. CONCLUSIONES

El presente proyecto tuvo como objetivo principal el desarrollo de un optimizador de bordes económicos óptimos aplicable a yacimientos mineros, implementado mediante el lenguaje de programación Python. El uso de esta herramienta permite obtener resultados en tiempos de procesamiento significativamente menores en comparación con plataformas convencionales como Excel, además de ofrecer una solución especializada para el cálculo y la definición precisa de perímetros de excavación por subnivel.

El diseño del optimizador se estructuró en diversas etapas, destacando entre ellas:

- La implementación de un módulo de valorización por borde dentro del código principal.
- La creación de un visualizador que identifica las barras extraíbles para cada cota definida.
- El desarrollo de una interfaz gráfica que facilita la interacción entre el usuario y el optimizador.

Como resultado de estos componentes, la herramienta desarrollada es capaz de entregar la configuración del borde óptimo para el modelo evaluado, complementando la información con representaciones visuales en tres dimensiones del modelo y de los puntos óptimos por barra. Adicionalmente, se generan gráficas que reflejan el beneficio asociado a cada piso, así como vistas en planta que indican los niveles óptimos.

Esta combinación de visualizaciones y resultados numéricos permite al usuario interpretar con claridad si el modelo presenta un óptimo económico y cómo este se distribuye a lo largo de las cotas del yacimiento.

En consecuencia, se concluye que el optimizador desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos planteados al inicio del proyecto, posicionándose como una herramienta eficaz y práctica para apoyar la toma de decisiones en el diseño de la explotación minera.

V. REFERENCIAS

- [1] Brazil, M. & Grossman P. (2008), “Access layout optimization for underground mines”, Australian Mining Technology Conference, 2008.
- [2] Calderón, J., (2011), “Desarrollo de una herramienta para planificación de largo plazo en Block/Panel Caving”, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas, Universidad de Chile, 2011.
- [3] Dunstan, G. and Power, G. (2011) ‘Part 13: Underground extraction, Sublevel Caving’, in *SME Mining Engineering Handbook*. Third Edition. Society for Mining, pp. 1417–1435.
- [4] Núñez, V., (2022), “Seleccionador de piso óptimo económico para explotación por hundimiento de bloques desarrollado bajo Python”, Memoria para optar al título de Ingeniera Civil de Minas, Universidad Técnica Federico Santa María, 2022.
- [5] Bull G., Page, C.H. 2000. Sublevel Caving—Today’s dependable low cost ore factory. In *Mass Mining 2000 Conference Proceedings*. Edited by G. Chitombo. Melbourne, Australia: Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- [6] Hustrulid, W. 2000. Method selection for large scale underground mining. In *Mass Mining 2000 Conference Proceedings*. Edited by G. Chitombo. Melbourne, Australia: Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- [7] Hustrulid, W., Kvapil, R. 2008. Sublevel Caving—Past and present. In *Mass Mining 2008 Conference Proceedings*, Luleå, Sweden, June 9-11. Edited by H. Schunnesson. Luleå, Sweden: Luleå University of Technology.
- [8] O, P. P., P, M. Q., Z, F. L., F, A. V., & C, W. Y. (2021). Trends in Underground Mining. *International Journal of Engineering and Management Research*, 11(4). <https://doi.org/10.31033/ijemr.11.4.31>

VI. ANEXOS

Anexo 1

```
def Asignar():
    Costo_prep_bar = num
    ventana.destroy()

ventana = Tk()
ventana.title('Costo de preparación por barra')
ventana.geometry("700x400")

num = IntVar()

textoN = Label(ventana, text= "Agrega el valor del costo de preparación por barra:")
textoN.place(x=70, y =70)

textoP = Label(ventana, text = "US$/BAR")
textoP.place(x=200,y=150)

caja = Entry(ventana, textvariable=num)
caja.place(x=350,y=150)

boton1 = Button(ventana, text = "Ingresar", command= Asignar)
boton1.place(x=180, y=200)
ventana.config(bg="#fff")

ventana.mainloop()
```

Anexo 2

```
i = 1
prev_row = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'E' + str(i)
    i = i + 1
    if (row[1].value == prev_row[1] and row[2].value == prev_row[2]):
        prev_row[1] = row[1].value
        prev_row[2] = row[2].value
        Hoja1[espacio] = int(0)

    else:
        prev_row[1] = row[1].value
        prev_row[2] = row[2].value
        Hoja1[espacio] = int(1)
i=i+2
Hoja1[espacio]=1
Hoja1['E1'] = 'NuevaBarra'
```

Anexo 3

```
i = 1

for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'F' + str(i)
    i = i + 1
    if (row[3].value == 'VB'):
        Hoja1['F1'] = 'Epos'

    elif (row[3].value > 0):
        Hoja1[espacio] = row[0].value

    else:
        Hoja1[espacio] = int(-1000)
```

Anexo 4

```
i = 1
prev_row = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'G' + str(i)
    i = i + 1
    if (row[4].value == 'NuevaBarra'):
        Hoja1['G1'] = 'SumAcum'

    elif (row[4].value == 1):
        prev_row[6] = row[3].value
        Hoja1[espacio] = row[3].value

    else:

        Hoja1[espacio] = int(prev_row[6]) + int(row[3].value)
        prev_row[6] = Hoja1[espacio].value
```

Anexo 5

```
i = 1
prev_row = [0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
Max = []
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'H' + str(i)
    i = i + 1
    if (row[4].value == 'NuevaBarra'):
        Hoja1['H1'] = 'OptIndex'

    elif (row[4].value == 1):
        Max.append(prev_row[6])
        prev_row[6] = row[6].value
        Hoja1[espacio] = row[6].value

    else:
        if (prev_row[6] < row[6].value):
            prev_row[6] = row[6].value
            Hoja1[espacio] = row[6].value
        else:
            Hoja1[espacio] = prev_row[6]
```

```
i = 1
j = 0
x = 1
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'I' + str(i)
    i = i+1
    if row[4].value == 'NuevaBarra':
        Hoja1[espacio] = 'Opt Index2'

    elif row[4].value == 1:
        j = j+1
        Hoja1[espacio] = 0
        x = 0

    else:
        if x == 0:
            if row[6].value == Max[j]:
                Hoja1[espacio] = 1
                x = 1
            else:
                Hoja1[espacio] = 0
        else:
            Hoja1[espacio] = 0
```

Anexo 6

```
i = 1
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'J' + str(i)
    i = i + 1
    if row[8].value == 'Opt Index2':
        Hoja1[espacio] = 'Opt Value'

    elif row[8].value == 1:
        Hoja1[espacio] = row[6].value - num.get()

    else:
        Hoja1[espacio] = 0
```

Anexo 7

```
i = 1
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'K' + str(i)
    i = i + 1
    if row[8].value == 'Opt Index2':
        Hoja1[espacio] = 'Opt Borde'

    elif row[8].value == 1:
        Hoja1[espacio] = row[0].value

    else:
        Hoja1[espacio] = 0
```

Anexo 8

```
i = 1
prev_row = [0]
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'L' + str(i)
    i = i + 1
    if row[8].value == 'Opt Index2':
        Hoja1[espacio] = 'Sumatoria'

    elif row[4].value == 0:
        if prev_row[0] + row[5].value + int(1000) == 0:
            Hoja1[espacio] = 0
        elif prev_row[0] + row[3].value < 0:
            Hoja1[espacio] = 0
        else:
            Hoja1[espacio] = prev_row[0] + row[3].value
            prev_row[0] = Hoja1[espacio].value

    else:
        Hoja1[espacio] = 0
        prev_row[0] = 0
```

```
i = 1
for row in Hoja1.iter_rows():
    espacio = 'M' + str(i)
    i = i + 1
    if row[8].value == 'Opt Index2':
        Hoja1[espacio] = 'Val bar'

    elif row[11].value < num.get():
        Hoja1[espacio] = 0

    else:
        Hoja1[espacio] = row[11].value - num.get()
```

Anexo 9

```
def Boton3D():
    x=[]
    y=[]
    z=[]
    for row in Hoja1.iter_rows():
        if row[8].value == 1:
            x.append(row[0].value)
            y.append(row[1].value)
            z.append(row[2].value)

    fig = plt.figure()
    ax1 = fig.add_subplot(111, projection='3d')

    ax1.scatter(x, y, z, c='b', marker='.')
    ax1.set_xlabel ("Este")
    ax1.set_ylabel ("Norte")
    ax1.set_zlabel ("Cota")
    ax1.set_title ("Vista 3D de borde óptimo por barra", fontsize =14, fontweight = "bold")

    plt.show()
```

```
def BotonModelo():
    x=[]
    y=[]
    z=[]
    i = 1
    for row in Hoja1.iter_rows():
        if row[0].value == "Este":
            i = i + 1
        elif row[3].value > 0:
            x.append(row[0].value)
            y.append(row[1].value)
            z.append(row[2].value)

    fig = plt.figure()
    ax1 = fig.add_subplot(111, projection='3d')
    ax1.set_xlabel ("Este")
    ax1.set_ylabel ("Norte")
    ax1.set_zlabel ("Cota")
    ax1.set_title ("Vista 3D del modelo VB > 0", fontsize =14, fontweight = "bold")

    ax1.scatter(x, y, z, c='b', marker='s')
    plt.show()
```

```

def BotonBorde():
    df = pd.read_excel("Optimizador.xlsx", sheet_name = "Mapadecolor")
    symbol = ((np.asarray(df['Norte'])))
    perchange = ((np.asarray(df['Cota'])))

    result = df.pivot(index='Cota',columns='Norte',values='Este')

    labels = (np.asarray(["{0} \n {1:.2f}".format(symb,value)
                           for symb, value in zip(symbol.flatten(),
                                                    perchange.flatten())])
              )
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(13,7))

    title = "Vista perfil de bordes óptimos por barra"

    plt.title(title,fontsize=18)
    ttl = ax.title
    ttl.set_position([0.5,1.05])

    ax.set_xticks([])
    ax.set_yticks([])

    sns.heatmap(result, annot = False, fmt="",cmap='RdYlGn',linewidths=0.30,ax=ax)

    plt.show()

```

```

def Boton1(plot1):
    WB = openpyxl.load_workbook('Optimizador.xlsx')
    x =[]
    y =[]
    i = 1
    for row in Hoja2.iter_rows():
        if row[0].value == "Este":
            i = i+1
        else:
            x.append(row[0].value)
            y.append(row[1].value)

    plot1.clear()
    plot1.plot(x,y, "b")
    plot1.set_ylabel('Beneficio [US$]')
    plot1.set_xlabel('Este')
    plot1.set_title('Beneficio vs Este', fontsize=15)

    canvas.draw()
    canvas.get_tk_widget().pack()
    toolbar = NavigationToolbar2Tk(canvas, miFrame)
    toolbar.update()
    canvas.get_tk_widget().pack()

```

Anexo 10

```
cotas = []
for row in Hoja1.iter_rows():
    if row[2].value not in cotas and row[2].value != 'Cota':
        cotas.append (row[2].value)

x=[]
y=[]
z=[]
for row in Hoja1.iter_rows():
    if row[8].value == 1:
        x.append(row[0].value)
        y.append(row[1].value)
        z.append(row[2].value)
```

```
def Boton5(seleccionar):
    ventana = Tk()
    ventana.title('Seleccione Cota')
    ventana.geometry("700x400")
    ventana.config(bg="#fff")

    opcion = StringVar()
    opcion.set(str(cotas[0]))

    def actualizar_label(*args):
        label_valor.config(text=f"{opcion.get()}")

    def Seleccionar():
        cota_elegida = float(opcion.get())
        ventana.destroy()
        df = pd.read_excel(workbook1,sheet_name = 'Sheet1')
        plot1.clear()
        WB = openpyxl.load_workbook('Optimizador.xlsx')
        x = []
        y = []
        i = 1
        capturando = True
        for row in Hoja1.iter_rows():
            if row[0].value == 'Este':
                i = i+1
            if row[4].value == 1:
                capturando = True
            if row[2].value == cota_elegida and row[14].value != 0 and row[11].value > 0 and capturando == True:
                x.append(row[0].value)
                y.append(row[1].value)
                if row[8].value == 1:
                    capturando = False

        plt.figure()
        plt.scatter(x, y, s=40, marker='s', c='g')
        plt.xlabel('Este')
        plt.ylabel('Norte')
        plt.title(f'Vista planta para cota {cota_elegida}')
        plt.show()
```

```

Label(ventana, text="Perímetros según cota", font=("Arial", 16, "bold"), bg="#f0f0f0").place(x=200, y=40)

opciones_menu = [str(c) for c in cotas]
menu = OptionMenu(ventana, opcion, *opciones_menu)
menu.config(width=15, font=("Arial", 12), bg="white", fg="black")
menu.place(x=250, y=100)

marco_valor = Frame(ventana, width=200, height=80, bg="ffffff", bd=2, relief="groove")
marco_valor.place(x=250, y=160)

label_valor = Label(marco_valor, text=opcion.get(), font=("Arial", 20, "bold"), bg="ffffff", fg="#007acc")
label_valor.place(relx=0.5, rely=0.5, anchor="center")

boton = Button(ventana, text="Confirmar", command=Seleccionar, font=("Arial", 12), width=15, bg="#007acc", fg="white")
boton.place(x=270, y=270)

opcion.trace('w', actualizar_label)
ventana.mainloop()

```

Anexo 11

```

workbook1 = "Optimizador.xlsx"

window = Tk()
window.title('Optimizador de bordes óptimos')
window.geometry("1130x700")
window.iconbitmap("icono.ico")
window.resizable(0,0)
img = PhotoImage(file="USM.png")
lbl_img = Label(window, image = img).place(x= 870, y = 10)

miFrame = Frame(window, width = 600 , height= 500)
miFrame.config(bg= "white")
miFrame.pack(expand=50)

fig = Figure(figsize = (8, 5), dpi = 90)
plot1 = fig.add_subplot()
canvas = FigureCanvasTkAgg(fig, master = miFrame)

```

```

botonModelo = Button(master = window, height = 4, width = 10, command = BotonModelo, text = "Modelo"). place(x= 50 , y= 100 )
boton3D = Button(master = window, height = 4, width = 10, text = "3D", command = Boton3D). place(x= 50 , y= 200 )
botonBorde = Button(master = window, height = 4, width = 10, command = BotonBorde, text = "Borde óptimo"). place(x= 50 , y= 300 )

boton1 = Button(master = window,
                command = partial(Boton1, plot1),
                height = 2,
                width = 10,
                text = "Gráfico").place(x=870, y = 200 )

boton5 = Button(master = window,
                command = partial(Boton5, plot1),
                height = 2,
                width = 20,
                text = "Perímetros"). place(x= 870 , y= 550 )

window.mainloop()

```

Anexo 12

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import openpyxl
from functools import partial
from tkinter import *
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
import matplotlib
from matplotlib.pylab import mpl
from matplotlib.figure import Figure
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg, NavigationToolbar2Tk
import os
from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
import numpy as np
import seaborn as sns
```