

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE
MATERIALES

SANTIAGO DE CHILE



ANÁLISIS Y PROYECCIÓN DEL BENEFICIO Y GASTO QUE SE OBTIENE CON MINERÍA CONTINUA

CATALINA ALEXIA FERNÁNDEZ NAVARRO

Memoria para optar al Título profesional de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:

Rodrigo Diaz – SQM

Tatiane Marin

Enero 2025

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, amigos y seres queridos, quienes han sido un pilar fundamental durante estos años de carrera. A ustedes, que siempre me ofrecieron su apoyo incondicional, su ánimo en los momentos más oscuros y su confianza en mí, incluso cuando yo mismo dudaba de lo que podía lograr. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo y cada momento compartido me ayudaron a mantenerme en pie y a seguir adelante.

En especial, a mi mamá, mi mayor fuente de inspiración y fortaleza. A ti, que siempre has estado a mi lado, incluso cuando las cosas no eran fáciles para ti. Nunca dejaste de creer en mí y me diste la fuerza para levantarme y seguir adelante, aun cuando yo no quería hacerlo. Gracias por ser mi ejemplo, mi refugio y mi mayor apoyo. Este logro es tanto mío como tuyo.

RESUMEN

En el presente trabajo se abarca el tema de análisis y proyecciones del beneficio y gasto obtenido utilizando equipos de minería continua. El estudio toma lugar en la mina Pampa Hermosa, perteneciente a la faena Nueva Victoria de la empresa SQM, ubicada en el Norte de Chile. La empresa proporciona la información y bases de datos las cuales serán analizadas mediante la herramienta Excel.

Este trabajo busca determinar variables relevantes que permitan analizar el beneficio del bloque, el costo basado en el gasto de puntas para así finalmente lograr predecir como se comportara el gasto de puntas en función de la dureza del suelo con sus respectivos costos.

El análisis comienza con una limpieza de los datos entregados, buscando no toparnos con datos erróneos que puedan intervenir con los cálculos a realizar. Una vez realizada la limpieza se analizan los indicadores de productividad para buscar una relación significativa entre la dureza que presenta el suelo de la mina, con las toneladas de material extraído y costo de este.

A continuación, se calcula el beneficio que se obtendría del modelo de bloques sin tener en cuenta la dureza del suelo y se compara con el resultado obtenido del cálculo considerando la dureza del suelo. De esta comparación se logra observar que el porcentaje de diferencia que hace este análisis de la dureza no es tan significativo a una escala global, es decir, se tiene una diferencia del -0.03%, por otro lado, si solo se considera el costo mina al momento de calcular el beneficio del bloque, nos encontramos con una diferencia que llega hasta un 12%. Si bien estos valores obtenidos no son tan altos como para realizar una modificación a nivel de planificación minera, si pudiese ser relevantes al nivel del departamento de gestión de mina.

Luego, para lograr una proyección de gasto se dividen los datos en 24 escenarios, según turnos, marcas de puntas y dureza del suelo, con estos escenarios podemos observar que los datos se distribuyen de forma lognormal. Una vez conocido como se distribuyen los datos se procede a realizar simulaciones de Monte Carlo para cada escenario, con el propósito de predecir como se comportará el gasto de puntas y su costo en cada dureza. De esto último se puede ver que a medida que el suelo es más duro, hay un mayor gasto de puntas, un mayor costo y un menor tonelaje extraído, lo cual se evidencia en el pronóstico de gasto de puntas con su respectivo costo estimado.

Finalizando este estudio, se recomienda tener una mayor claridad de donde se ubican las zonas más duras en el pit a extraer y delimitarlas, de esta forma se podrá tener un mejor control del gasto de puntas y así de los costos que éstas conllevan.

ABSTRACT

This study addresses the analysis and projections of benefits and expenses associated with the use of continuous mining equipment. The study takes place at the Pampa Hermosa mine, part of the Nueva Victoria operation owned by SQM, located in northern Chile. The company provides the information and databases, which are analyzed using Excel as the primary tool.

The objective of this study is to identify relevant variables that enable the analysis of block profitability and the costs based on cutting tool expenditures, ultimately aiming to predict how these expenditures will behave as a function of soil hardness, along with their corresponding costs.

The analysis begins with the cleaning of the provided data to ensure that erroneous data, which could interfere with calculations, are excluded. Once the data is cleaned, productivity indicators are analyzed to establish a significant relationship between the hardness of the mine's soil, the tons of material extracted, and the associated costs.

Subsequently, the benefit derived from the block model is calculated without considering soil hardness and compared to the results obtained when soil hardness is taken into account. This comparison reveals that the percentage difference introduced by including soil hardness in the analysis is not globally significant, with a difference of -0.03%. However, if only mine costs are considered in the block benefit calculation, the difference reaches up to 12%. While these results are not substantial enough to warrant modifications at the mine planning level, they could be relevant at the mine management department level.

To achieve an expenditure projection, the data is divided into 24 scenarios based on shifts, cutting tool brands, and soil hardness. These scenarios show that the data follows a lognormal distribution. Once the data distribution is identified, Monte Carlo simulations are performed for each scenario to predict the behavior of cutting tool expenditures and their associated costs for each hardness level. The results indicate that as soil hardness increases, there is a corresponding increase in cutting tool consumption, higher costs, and lower tonnage extracted. This trend is evidenced in the forecast of cutting tool expenses and their estimated costs.

In conclusion, it is recommended to improve the identification and delineation of harder zones within the pit to be extracted. This would allow for better control of cutting tool consumption and, consequently, the associated costs.

KEYWORDS: *Continuous mining, block model, benefit, Monte Carlo*

Tabla de contenido

1	INTRODUCCION.....	9
1.1	Objetivos	9
1.1.1	Objetivos generales.....	9
1.1.2	Objetivos específicos.....	9
1.2	Alcances	10
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
3	MARCO TEORICO	11
3.1	Operación Nueva Victoria.....	11
3.2	Descripción del terreno	12
3.3	Minería a cielo abierto.....	14
3.4	Minería de yodo y nitrato	14
3.5	Métodos de explotación.....	15
3.5.1	Minería continua.....	15
3.5.2	Perforación y tronadura	20
3.6	Caliche.....	21
3.7	Dureza	24
3.8	Planificación minera.....	25
3.9	Beneficio	26
3.10	Ley de corte.....	27
3.11	Razón de costos.....	28
3.12	Modelo de bloques	30
3.13	KPI	30
3.14	Análisis predictivo.....	30
3.14.1	Monte Carlo.....	31

4	METODOLOGIA.....	32
5	DESARROLLO.....	33
6	RESULTADOS.....	43
7	CONCLUSIONES.....	49
8	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFIA.....	50
9	ANEXO	53

Lista de figuras

Figura 1: Ubicación Pampa Hermosa

Figura 2: Diagrama minería del yodo y nitrato (SQM, s. f.-c)

Figura 3: Equipo Vermeer

Figura 4: Punta de tungsteno (Finning, s. f.)

Figura 5: Diagrama comparativo métodos de explotación.

Figura 6: Caliche (W. Griem, 2009)

Figura 7: Mapa Norte de Chile enseñando las zonas calicheras del país.

Figura 8: Resultado de la limpieza de datos.

Figura 9: Gráfica superior permite visualizar la cantidad de Ton/Puntas para cada dureza y la gráfica inferior muestra las puntas que se utiliza en promedio por cada dureza según el indicador de tonelaje/puntas.

Figura 10: Clasificación de datos.

Figura 11: Ejemplo de histograma para el escenario 18.

Figura 12: Representación porcentual de las durezas en el modelo de bloque.

Figura 13: Diferencias de costos porcentuales para las distintas durezas.

Figura 14: Pronóstico del gasto de puntas.

Figura 15: Pronóstico del costo según dureza.

Figura 16: Regresión del conjunto total de datos.

Figura 17: Regresión Turno A Sipervol

Figura 18: Regresión Turno C Sipervol

Figura 19: Regresión Turno A Kennametal

Figura 20: Regresión Turno C Kennametal

Figura 21: Regresión Turno A Betek

Figura 22: Regresión Turno C Betek

Figura 23: Representación del modelo de bloques en Vulcan.

Lista de tablas

Tabla 1: Dureza zonas de Pampa Hermosa. Fuente: Informe Reservas Pampa Hermosa SQM.

Tabla 2: Características equipos Vermeer.

Tabla 3: Características puntas.

Tabla 4: Principales características del Caliche.

Tabla 5: Variables utilizadas del modelo de bloques.

Tabla 6: Variables relevantes de la base de datos.

Tabla 7: Variables que componen la base de datos.

Tabla 8: KPIs o indicadores utilizados por la empresa.

Tabla 9: Variables fijas para el cálculo del valor del bloque, datos entregados por SQM.

Tabla 10: Variación del precio y la alteración al costo mina relacionado a la dureza del suelo.

Tabla 11: Escenarios a estudiar.

Tabla 12: Ejemplo de parámetros utilizados para el escenario 18.

Tabla 13: Ejemplo Costo y Ton/Puntas simulado, escenario 18.

Tabla 14: Costos por toneladas obtenidas con Monte Carlo para cada escenario.

Tabla 15: Estudio costo-eficiencia de puntas - SQM.

Tabla 16: Variables presentes en las bases de datos.

1 INTRODUCCION

En la mina Pampa Hermosa ubicada en la faena Nueva Victoria de la empresa SQM Nitratos, se hace uso de la denominada minería continua. Esta corresponde a un proceso productivo que desarrolla la faena. A grandes rasgos, esta actividad trabaja en sectores que el área de geología determina como las zonas a explotar, luego, dependiendo de la dureza del suelo, se elige el método de explotación adecuado, los cuales pueden ser: perforación y tronadura o minería continua.

En el caso de Pampa Hermosa el suelo tiende a ser más blando, ya que este presenta grandes cantidades de arenisca y brecha, minerales que poseen una dureza media, lo cual permite que se utilicen equipos de corte del área de minería continua; estos están equipados con puntas de tungsteno, las cuales permiten romper el suelo cuando lo impactan, dejando un cordón de material fragmentado a su paso que luego es retirado por los equipos de carguío y trasladados a pilas de lixiviación.

Este método utilizado en la mina es relativamente nuevo, por lo que sigue en estudio a diferencia del método de perforación y tronadura. Actualmente el *modus operandi* de lo que denominamos minería continua consiste en delimitar un sector para explotar y extraer todo el material presente en la zona, sin embargo, el estudio que se realizará quiere responder la interrogante de como impactaría el beneficio obtenido si al realizar una primera inspección y corte del pit a extraer, se determinan que zonas son las que generan un mayor y un menor gasto para así lograr un mejor uso de recursos y optimizar la operación.

Para este estudio se tuvo en cuenta el uso de equipos de corte Vermeer, los cuales utilizan puntas de tungsteno. También, se hizo enfoque principalmente en minerales como lo son el yodo y el nitrato, estos son prioridad en mina Pampa Hermosa. Con Excel se analizan los datos entregados por la empresa, se realizan cálculos de beneficio y se verifica la certeza de estos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos generales

Realizar un análisis de los datos entregados por la empresa SQM Nitratos referidos a minería continua, y verificar cómo influye la dureza del suelo en el cálculo del beneficio, en los costos y en la planificación.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analizar las variables relevantes de las bases de datos y los datos históricos del consumo de puntas según indicadores de productividad.

- Analizar la rentabilidad del bloque, la influencia que tiene el gasto de puntas sobre el costo mina y verificar si establecer cambios en la planificación de extracción permite un mayor beneficio.
- Realizar una proyección del consumo de puntas que se tendría según la dureza que presenta el suelo a explotar.

1.2 Alcances

- Se realizará el estudio para un modelo de bloque y dos bases de datos entregados por la empresa SQM.
- El modelo de bloques que se analiza presenta valores para minerales como I2, NaNO3, Ca, Mg, K, KClO4, Na2SO4, Na, NaCl, H3BO3 y Na2CO3. De esta lista solo se tomará en consideración en el estudio al yodo y el nitrato a pedido de la empresa reduciendo así el número de datos a analizar.
- La herramienta principal para realizar los análisis corresponde a Excel.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Lo que se busca con esta investigación es determinar si se puede aumentar el beneficio que se obtiene de explotar un pit delimitado. Para esto se determinan las zonas del pit que son más rentables para solo enfocar la extracción en estas y no gastar recursos en las zonas que generan más pérdida que ganancia.

Para esto se realizará una proyección de las zonas más rentables tomando como base los datos obtenidos del primer corte realizado al pit. Y luego se hará una comparación de beneficio, contrastando la ganancia que se obtiene al extraer todo el material en comparación a extraer solo las zonas que son beneficiosas. Esto busca maximizar el tiempo y los recursos de la empresa y disminuir el gasto extra de materiales.

A medida que el suelo se pone más duro, es decir, a mayor profundidad (debido a la compactación), el gasto de puntas irá incrementando y el tonelaje disminuyendo, por ende, la razón dólar tonelada será mayor, indicando un mayor gasto.

Se puede determinar con proyecciones que sectores del pit son las generaran un menor gasto y cuáles uno mayor. Para esto se utiliza la dureza del suelo la cual se divide en 4 categorías, donde “Dureza 1” corresponde a un suelo blando y “Dureza 4” a uno duro.

3 MARCO TEORICO

SQM es el principal productor mundial de yodo, litio y nutrientes vegetales que busca una reestructuración de la producción del salitre, mejorar la explotación y aumentar las inversiones, obteniendo el monopolio en la explotación y comercialización del salitre.

Para el año 1931 se iniciaron operaciones en la sede de Pedro de Valdivia utilizando el sistema productivo Guggenheim para elaborar nitrato de sodio y yodo. En 1951 se construyó una planta cristalizadora de nitrato en Coya Sur, aprovechando la precipitación de nitrato en las pozas de evaporación. Luego, para el año 1971, el Estado adquirió el 100% de la propiedad, dejando así nacionalizado la explotación del salitre.

La explotación de nitrato de potasio en Coya Sur comenzó en 1986 bajo un proceso nuevo y diseñado por SQM para luego en 1993 iniciar las operaciones de la planta de nitrato de potasio junto con la internalización de la compañía y el contrato de arriendo con CORFO de las pertenencias mineras en el Salar de Atacama, dando paso al proyecto de producción de potasio y litio. En 1995 se inicia la producción de cloruro de potasio en el Salar de Atacama y en 1997 la del carbonato de litio en el Salar del Carmen.

Se llevó a cabo la construcción de la planta de nitrato de potasio en Coya Sur en el año 2000, en conjunto con la ampliación de la producción de cloruro de potasio en el Salar de Atacama. En 2005 adquirió la empresa productora de fertilizantes solubles y en 2006 el negocio del yodo de DSM. Así se aumentó la capacidad de producción de la planta de yodo en Nueva Victoria.

En el año 2011 comienza la producción en una nueva planta de nitrato de potasio en Coya Sur, aumentando la producción anual a 300.000 ton, y en septiembre de 2012 se adquirió la licitación para acceder a los contratos especiales de la operación del litio.

3.1 Operación Nueva Victoria

La mina en la cual se desarrolla esta memoria corresponde a Pampa Hermosa, una mina de la Faena Nueva Victoria. Esta faena corresponde al centro productivo de yodo más grande del mundo. Esta presenta grandes depósitos de caliche de leyes heterogéneas, los cuales se extraen después de una larga planificación y exploración del área. El plan de extracción considera factores operativos como lo son las leyes del mineral, el uso del agua y el equilibrio entre la producción de nitrato y yodo mes a mes, junto con el diseño de la pila de mineral.

La operación que se lleva a cabo en la faena consiste en una primera instancia retirar y remover el material que cubre la capa mineral, para luego marcar las áreas que serán perforadas y posteriormente extraídas. Una vez extraído el material este es transportado a la zona donde se construyen las pilas y se lleva a cabo el proceso de lixiviación. Para realizar

el proceso de lixiviación en pilas hay que asegurarse que tengan una base impermeable para evitar la pérdida de solución y recolectar las soluciones de salmuera. Anualmente se construyen 44 pilas en promedio, cada una con un millón de toneladas de mineral las cuales se riegan durante 400 días aproximadamente.

Los sistemas de riego y el desempeño de las pilas son monitoreadas constantemente. De este proceso se obtiene una solución líquida que contiene nitratos y yodo a partir del caliche sólido. Con la ayuda de la gravedad la solución fluye hacia abajo a través de canales o tuberías de drenaje abiertas hasta los pozos de recolección. Para este proceso solo se hace uso de agua y soluciones recirculadas del mismo proceso. Meses después la solución de salmuera que contiene yodo y nitratos se envía a la planta de yodo para su separación y refinación (SQM, s. f.-b).

En Pampa Hermosa se realizan dos tipos de extracción, por un lado, está el proceso de tronadura, la cual consiste en la colocación de explosivos en perforaciones realizadas en el material para luego ser detonadas en forma secuencial, de esta forma se obtienen fragmentos del material que luego son retirados por equipos de carguío y llevados a la siguiente etapa. El otro método utilizado es el denominado por la empresa como minería continua, la cual consiste en utilizar equipos de corte, los que poseen puntas de tungsteno que permiten fragmentar el terreno a medida que avanzan, dejando un cordón de material fragmentado a su paso el cual es retirado por los equipos de carguío para luego ser transportado a las pilas de lixiviación. Esta minería continua es denominada así debido a que estos equipos de corte funcionan sin parar día y noche generando constantemente cordones de material fragmentado.

Dentro de las características que presenta el espacio en donde se encuentra el mineral a explotar se tiene la dureza del suelo, la cual se presenta en un rango de 0 a 4, donde 0 representa el suelo más blando y 4 el suelo más duro.

3.2 Descripción del terreno

En la Primera región de Tarapacá donde se distinguen cuatro unidades fisiográficas mayores, de orientación norte-sur, las cuales son de oeste a este Cordillera de la Costa, Pampa del Tamarugal o Depresión Central, Precordillera y Cordillera de los Andes.

Pampa Hermosa se ubica en la Región de Tarapacá, provincia El Tamarugal, comuna de Pozo Almonte, entre las coordenadas UTM 7.704.500N – 7.710.500N y 415.000E – 424.000E. Ubicada en el margen oriental de la Cordillera de la Costa, donde la zona presenta un relieve relativamente plano, con alturas que no sobrepasan los 1400 s.n.m. Se puede acceder al sector por la ruta A-760, aproximadamente 16 km al oeste de la Ex Oficina salitrera Victoria, ubicada en km 1.750, Ruta 5.

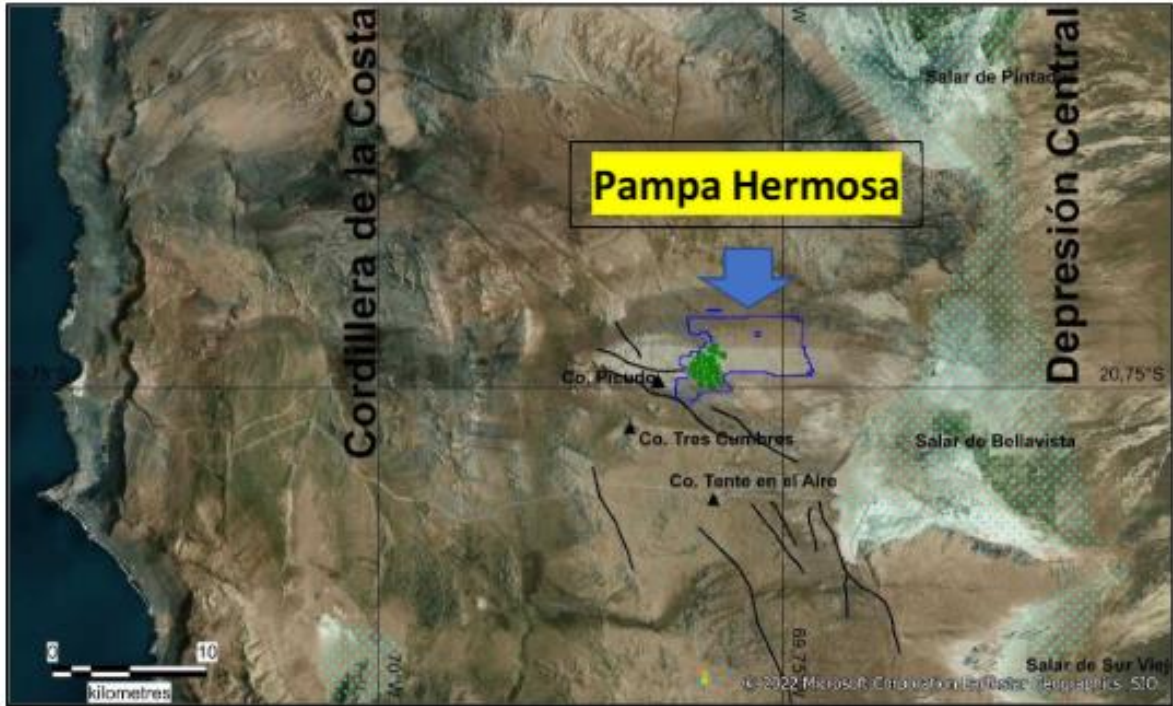


Figura 1: Ubicación Pampa Hermosa.

Pampa Hermosa se encuentra sobre brechas sedimentarias asociadas a procesos de acumulación mediante abanicos aluviales actualmente inactivos, es por esto por lo que este sector corresponde a un depósito de nitratos de tipo aluvial, ya que presenta una litología donde predominan las brechas sedimentarias monomícticas, brechas sedimentarias aligomícticas, areniscas y brechas conglomeradas oligomícticas. Respecto a la calidad geomecánica, este sector presenta una buena calidad con caliches mayoritariamente duros y con espesores de sobrecarga del orden de 20 a 30 cm. En este sector existe una unidad litológica de tipo arcillolita, con continuidad lateral y presencia en la vertical, con altos contenidos de materiales finos, enriquecimiento en concentraciones de nitrato y yodo, y baja presencia de sulfatos. Nos encontramos con un caliche complejo del punto de vista físico.

Tabla 1: Dureza zonas de Pampa Hermosa. Fuente: Informe Reservas Pampa Hermosa SQM.

Pampa Hermosa	Leyes					Matriz Salina	Dureza	
	Tonelaje (Ton)	Nitrato (%)	Yodo (ppm)	Esp Cal (m)	Esp Sc (m)	Sales Solubles (%)		
Zona I _1° Julio	12,000,000	6.9	467	4.0	0.2	64.9	3.1	Duro
Zona I _Rem (2023)	11,000,000	6.5	460	3.9	0.3	61.6	3.1	Duro
Zona II (2023 - 2024)	42,000,000	6.1	437	3.6	0.3	63.4	3.2	Duro
Zona I (MC)	3,000,000	7.1	483	3.9	0.3	62.3	3.2	Duro
Total	68,000,000	6.3	448	3.7	0.3	63.3	3.2	Duro

La calidad de los caliches se ve reflejada mediante test físicos y químicos a través de diamantinas y refinos del sector.

Le llamamos dureza a la resistencia que ofrecen los materiales a alguna alteración. En este caso la dureza tiene que ver con cuan compacto se encuentra el mineral en el terreno a explotar. De acuerdo con estudios en laboratorio de los testigos extraídos en la etapa de exploración, el suelo donde se realizará la explotación del pit presenta un promedio de 3.2, aproximado a una dureza de 3.

3.3 Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto corresponde a un método de extracción donde la operación minera se realiza en la superficie, esto es posible porque el yacimiento brota en superficie o a muy pequeña profundidad, es decir, el mineral o roca de interés se encuentra cerca de la superficie y se extiende sobre una gran área. Minería a cielo abierto se caracteriza por la excavación, ya que se remueven grandes cantidades de tierra y rocas. Para lograrlo se utiliza maquinaria pesada, como lo son las excavadoras, palas mecánicas, camiones de carga, perforadoras, entre otros equipos, o con el uso de explosivos. Este método es ampliamente utilizado, sin embargo, sus repercusiones ambientales y sociales son dañinas y objeto de críticas en muchos países (Ingeoexpert, 2018).

3.4 Minería de yodo y nitrato

La minería del yodo y del nitrato es una actividad que se desarrolla crucialmente en Chile, la cual produce un gran impacto económico en el país. En el norte de Chile se encuentran depósitos de caliche los cuales albergan estos minerales en cantidades comerciales (Millas, 2000).

Para la extracción y el procesamiento del yodo y nitrato se llevan a cabo las siguientes etapas:

1. Exploración y evaluación del yacimiento
 - a. En esta etapa se realizan sondajes exploratorios para extraer muestras de caliche para determinar el contenido de yodato y nitrato. A estas muestras se les realiza un análisis químico para determinar las leyes del mineral y así construir el modelo geológico del depósito para definir la secuencia de extracción.
2. Extracción del caliche
 - a. El caliche se encuentra en la superficie, por lo que se utiliza la minería a cielo abierto para la extracción. Primero se extrae la capa superficial de estéril y, dependiendo de la dureza que presente el caliche, se pueden utilizar dos tipos de métodos de extracción: voladuras controladas o maquinaria pesada.

- b. Luego de extraer el material este es transportado a la planta de lixiviación, donde se procesa para separar el yodo del nitrato.
3. Procesamiento del nitrato y yodo
- a. En la etapa de lixiviación se disuelve el caliche en solución caliente de agua o ácido débil, lo que permite extraer las sales solubles. El residuo insoluble se separa mediante filtración.
 - b. Luego se enfría la solución rica en nitratos para que se cristalice el nitrato de sodio.
 - c. Para obtener el yodo, los yodatos se reducen a yodo elemental mediante el uso de agentes reductores como el dióxido de azufre (SO₂). Luego el yodo precipitado se recolecta, se seca y se purifica mediante sublimación o recrystalización.



Figura 2: Diagrama minería del yodo y nitrato (SQM, s. f.-c).

3.5 Métodos de explotación

Dentro de los métodos de explotación, se tiene la perforación y tronadura, y por otro lado la minería continua. Si bien la perforación y tronadura es un método utilizado por bastante tiempo y universalmente hay ciertos escenarios en los cuales este no se puede utilizar, es ahí cuando entra la minería continua, permitiendo que se realice la extracción del mineral en los sectores donde no se puede utilizar perforación y tronadura.

3.5.1 Minería continua

Cuando se hace referencia a minería continua esta corresponde a un proceso ininterrumpido de excavación mecánica que busca aumentar la tasa de producción, reducir tiempos muertos, aumentar la seguridad en la mina y reducir el impacto que se genera usualmente al suelo cuando se utilizan explosivos. No olvidar que permite tener una mejor recuperación debido a que el tamaño del material que genera es más pequeño al obtenido con explosivos, pero no tanto que sea polvo.

El tipo de minería continua a la que se hace referencia por la empresa SQM corresponde a equipos de corte que se utilizan en la mina Pampa Hermosa, los cuales cuentan con un tambor equipado con brocas o puntas de tungsteno que rompen el suelo para extraer el mineral, estos equipos pueden ser Vermeer o Wirtgen, siendo Vermeer en el cual se va a enfocar este trabajo, ya que es el que entrega mejores resultados. Una vez que se obtiene el mineral cortado este es extraído utilizando camiones y palas de extracción.

Cabe mencionar que el método de minería continua se utiliza exclusivamente cuando el material no puede ser extraído por perforación y tronadura, es decir, cuando las reservas mineras se encuentran muy cercanas a infraestructura crítica, como lo son poblados cercanos, líneas de alta tensión y caminos públicos.

a. Equipos de Minería Continua

Los equipos en minería continua se utilizan para extraer el material que luego es transportado a la etapa de procesamiento. Estos equipos utilizan picas o puntas de tungsteno que permiten romper el suelo donde se encuentra el mineral.

b. Vermeer

Vermeer corresponde a una empresa que diseña y fabrica equipos industriales los cuales son ideales para levantar infraestructuras, hacer una mejor gestión de recursos, alimentar y llenar de energía las comunidades alrededor del mundo. En esta memoria se hará enfoque en el equipo *T125III CHAIN DRIVE TERRAIN LEVELER SEM* (Vermeer, s. f.).

Este equipo permite llevar a cabo una extracción de minería de superficie, remover suelo superficial o crear un área uniforme para un sitio de preparación. Sus características y beneficios son:

- *Remote attachment control (RAC)*
- *TEC Plus computer-aided control system*
- *Load control*
- *Elevated, climate-controlled cab*
- *High wall capacity*
- *Optional warranty*



Figura 3: Equipo Vermeer.

Tabla 2: Características equipos Vermeer.

Característica	Valor	Unidad
Ancho de corte	Hasta 3.7	metros
Profundidad de corte	Hasta 0.8	metros
Potencia	600	HP

El uso de estos equipos es preferible para la operación realizada en Pampa Hermosa, ya que cortan el material de manera eficiente y lo cargan a camiones. Permiten la reducción de costos en explosivos, perforación y reparaciones asociadas a vibraciones. La forma precisa de cortar permite minimizar la dilución con material estéril, además también cuentan con un sistema de control de polvo lo cual es ideal para las operaciones que se llevan a cabo al aire libre.

c. Puntas de equipos de Minería Continua

Lo que se denomina puntas corresponden a piezas que se utilizan como accesorio abrasivo en máquinas de movimiento de tierra, estas van adheridas al tambor de los equipos de corte que se utilizan al extraer material en la mina. Estas se fabrican con tungsteno que, según la escala de dureza de Mohs, es uno de los materiales más duros que se conocen llegando a la categoría número 8. Es por esto por lo que en minería extractiva se hace uso de puntas hechas con este componente, ya que permite romper la superficie a trabajar para extraer el material necesitado (Tima, 2021).

Las puntas ocupadas por la empresa están compuestas por carburo de tungsteno, el cual al combinarlo con cobalto produce otro material aún más resistente, que puede soportar cargas de impacto extremas aportando un mayor rendimiento. Este material es aproximadamente 3 veces más rígido que el acero, más denso que el titanio y casi tan duro como el diamante (BETEK, s. f.).

Algunas de las cualidades que presentan son:

- Resistencia a los arañazos
- Posibilidad de perforar superficies de rocas más resistentes
- Adecuación a superficies duras y blandas
- Reducción del desgaste
- Buen rendimiento

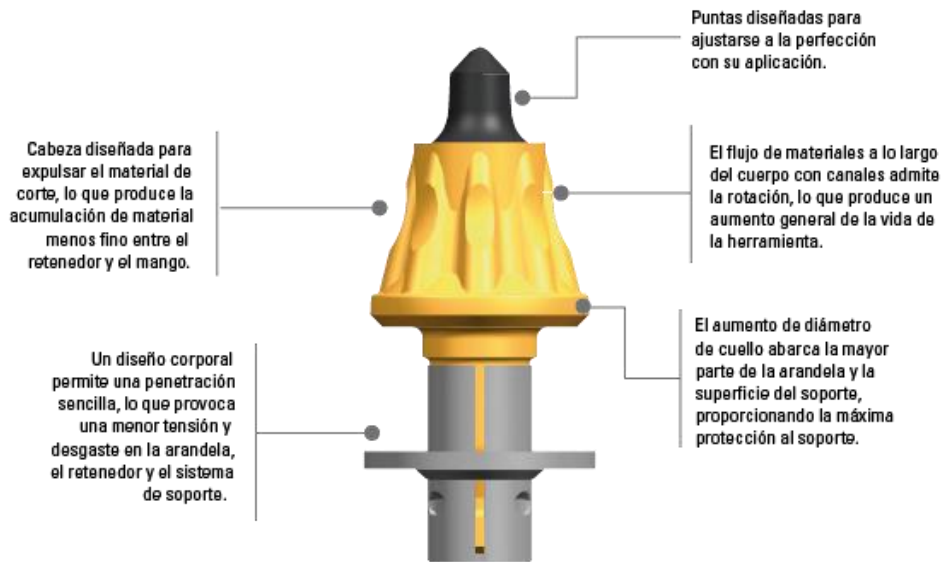


Figura 4: Punta de tungsteno (Finning, s. f.).

Tabla 3: Características puntas.

Característica	Valor	Unidad
Material	Tungsteno	-
Vida Útil	Suelo Blando – de 40 a 80 Suelo Duro – menos de 20	Horas
Precio	26 - 27	US\$

Estas puntas no son eternas y requieren constante cambio debido a que se desgastan a medida que avanza el equipo. Por lo tanto, son un costo que se debe considerar al momento de realizar un estudio de beneficio del corte por pit.

Causas del desgaste de puntas:

- a) Abrasión
 - a. Ocurre por el constante contacto con partículas duras y abrasivas al momento de cortar.
 - b. En la minería del caliche esta causa es una de las principales en afectar las puntas, debido a que el material a cortar suele ser heterogéneo.
- b) Impacto repetitivo
 - a. Los golpes repetitivos al cortar materiales duros generan pequeñas fracturas acelerando el desgaste.
- c) Temperaturas altas

- a. El sobrecalentamiento puede provocar un desgaste acelerado, oxidación y pérdida de dureza.
- d) Calidad del material
 - a. Referente a los cambios abruptos en la dureza del terreno provocan un desgaste desigual en las puntas.

Indicadores de desgaste:

- Aumento en el consumo de energía del equipo.
- Reducción de la tasa de corte.
- Mayor vibración durante la operación.
- Una mayor cantidad de puntas a ser reemplazadas.

La duración típica de puntas en Minería Continua generalmente en terrenos blandos una punta puede durar entre 40 y 80 horas de trabajo continua, es decir, alrededor de 3 días, y en terrenos donde el suelo es duro y abrasivo, la vida útil de las puntas puede reducirse a menos de 20 horas de trabajo continua, es decir, menos de 1 día.

3.5.2 Perforación y tronadura

El método de explotación de perforación y tronadura consiste en abrir en la roca huecos cilíndricos donde se insertan explosivos, los cuales, al explotar, permiten triturar la roca, dejando el material fragmentado y de un tamaño adecuado que facilita su transporte para su próximo procesamiento (SONAMI, 2014).

Además, este método pretende garantizar la seguridad, eficiencia y optimización de recursos, por lo que cada etapa de este proceso requiere de ajustes en función de las características que presenta el terreno, ya sea dureza, cohesión, presencia de fracturas y características del mineral.

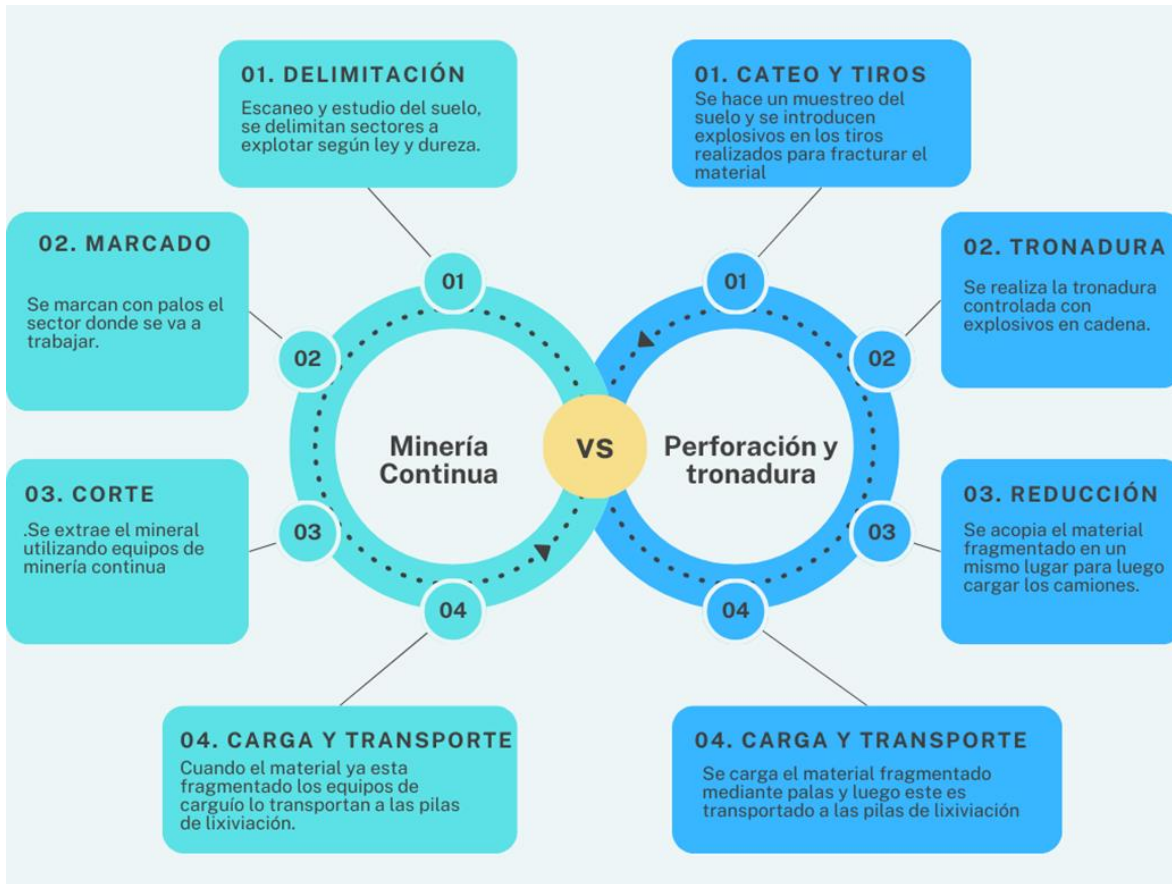


Figura 5: Diagrama comparativo métodos de explotación.

3.6 Caliche

Caliche proviene de la palabra “cachi” que en quechua significa “sal”, y luego se derivó al término “caliche”. Definida como una sustancia arenosa que contiene nitrato de sodio y otras sustancias la cual aflora con abundancia en el desierto de Atacama y constituye la materia prima para la obtención del yodo y del nitrato (ASALE & RAE, s. f.).

El caliche es una roca sedimentaria que se compone principalmente por yodo (yodato), nitrato (NaNO_3 o salitre) y otros minerales (sulfatos, cloruros, carbonatos y boratos).

Según la leyenda este fue descubierto a mediados del siglo XIV, por un grupo de indios atacameños que al prender una fogata con ramas quedan sorprendidos cuando el suelo y las piedras se encienden y chisporrotean. Luego, con la llegada de los españoles a inicios del siglo XVI, se realizan los primeros estudios de estas “piedras endemoniadas” y se dan cuenta que estas piedras contienen una sal similar a la que se utilizaba para elaborar pólvora, pero en menor poder. Sin más que hacer con estas muestras las arrojan en los alrededores de la

zona donde habitaban y varias semanas después notan que la vegetación es más exuberante en las zonas donde desecharon las muestras en comparación con el resto de la flora del sector, descubriendo así su poder como fertilizador (SQM, s. f.-a).



Figura 6: Caliche (W. Griem, 2009).

Los yacimientos de nitrato se encuentran generalmente en los bordes de los salares, en la vertiente oeste a una elevación de 1000 a 1200 metros sobre el nivel del mar. En el norte de Chile se encuentran los depósitos de nitratos entre la parte oriental de la Cordillera de la Costa y occidental de la Depresión Central.

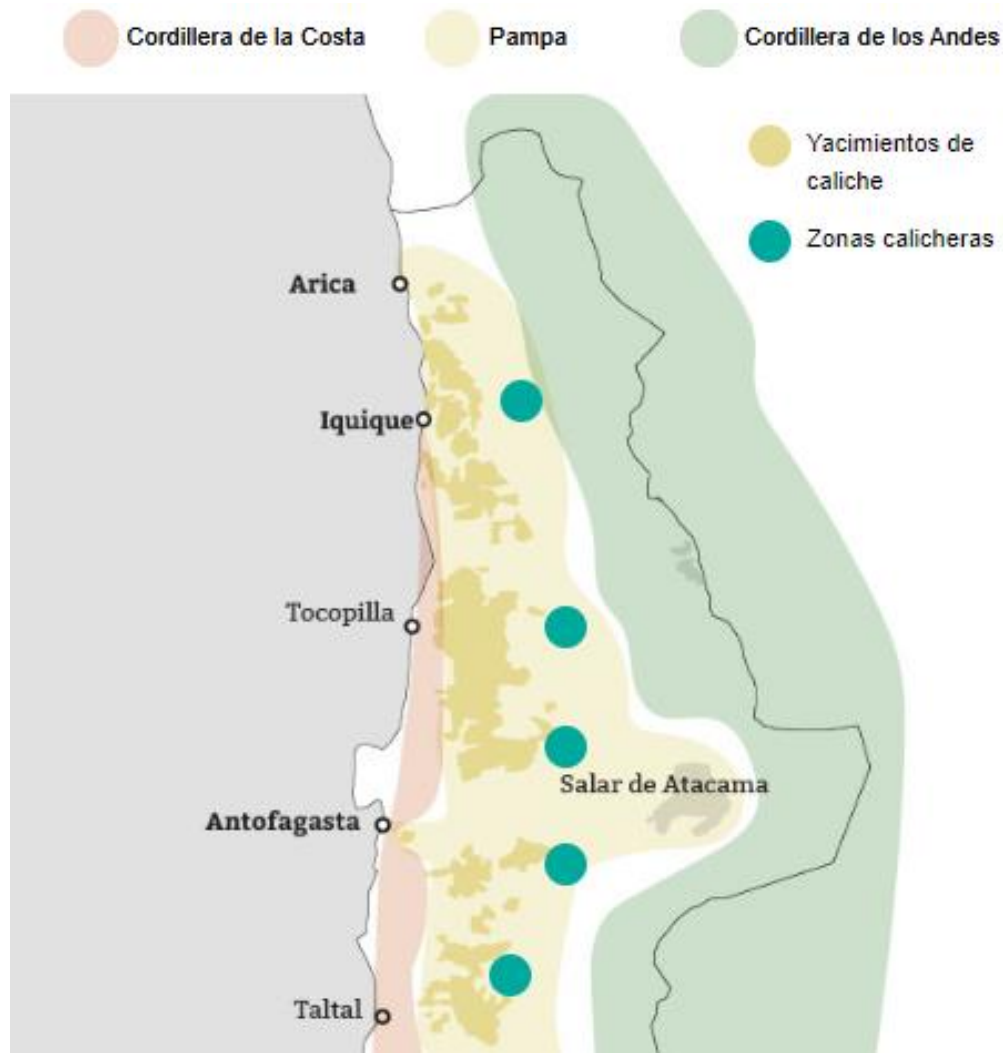


Figura 7: Mapa Norte de Chile enseñando las zonas calicheras del país.

En general, el caliche tiende a ser relativamente duro, más aún cuando este se encuentra compactado. Sin embargo, su dureza específica puede variar desde relativamente blanda hasta bastante dura, dependiendo de la concentración de minerales y la compactación del material. Para determinar la dureza del caliche en un lugar específico, es necesario realizar pruebas específicas de compresión, penetración o de abrasión, esto con el fin de evaluar su resistencia y dureza.

Tabla 4: Principales características del Caliche.

Características	
Dureza	1 - 2 Mohs
Peso específico	3.7 - 3.9 [g/cm ³]
Color raya	Azul claro
Brillo	Vitreo
Fracturamiento	Concoidal
Sistema Cristalino	Trigonal
Color	Transparente, blanco, azul, morado

3.7 Dureza

La dureza es una de las propiedades físicas de los minerales que permite su correcto reconocimiento. Cuando se habla de la dureza del suelo, se hace referencia a la resistencia que ofrece un mineral, roca o suelo a ser rayado, perforado, triturado o deformado. El concepto de dureza es importante porque afecta directamente a los métodos de extracción y el tipo de maquinaria necesaria, al igual que los costos operativos, esto porque un material más duro exige más energía, explosivos o desgaste de equipos para su procesamiento (PETROENERGÍA, 2022).

Dentro de la minería tenemos varios tipos de dureza, como lo son:

- Dureza Mohs
- Dureza Brinell y Rockwell
- Resistencia a la compresión
- Dureza abrasiva

Y también los métodos que permiten determinar la dureza del suelo

- Ensayo de campo con martillo de Schmidt
- Prueba de resistencia a la compresión
- Permeabilidad y cohesión del suelo
- Evaluación mediante perforación exploratoria
- Ensayos petrográficos

Para mineras que se enfocan en explotar el caliche, los métodos más comunes para determinar la dureza del suelo son los ensayos de campo, pruebas de resistencia a la compresión y

perforaciones exploratorias, las cuales permiten entender la resistencia que presenta el material y así lograr ajustar las técnicas de explotación de tal forma de minimizar los costos y seleccionar los equipos adecuados.

SQM se utilizan dos métodos que permiten calcular la dureza del suelo, la primera corresponde a análisis en laboratorio de perforaciones exploratorias donde con la velocidad de perforación se obtiene, un KPI m/min y se correlaciona con la dureza, es decir, donde existe un mayor KPI se tiene una mayor dureza. El segundo método por utilizar incluye un mapeo y ensayo locales con martillo Schmidt, este consiste en medir el rebote de un embolo metálico (martillo tipo L) que impacta la superficie del material. Este método permite calibrar el modelo de la dureza y calcular la resistencia a la compresión del suelo.

3.8 Planificación minera

La planificación minera es el proceso sistemático de organización y diseño de las operaciones mineras que se deben llevar a cabo para maximizar la extracción rentable de los recursos minerales. Este proceso determina que porción del yacimiento será extraído y todas las etapas, desde la exploración y evaluación del yacimiento, hasta la programación de las actividades de extracción y procesamiento.

La planificación se compone por etapas de definición de la envolvente económica, determinación del método de explotación, diseño operacional, secuencia de explotación y su posterior evaluación económica. Determinando las reservas mineras y el beneficio final de todo el proyecto.

Durante el proceso de diseño y secuenciamiento de la mina, la geomecánica permite validar y/o predecir los riesgos asociados al diseño y el plan minero.

Los análisis se llevan a cabo utilizando herramientas como lo son software de planificación (Mineplan, Vulcan, entre otros), modelos de simulación, sistemas de gestión de flotas y modelos de optimización matemática, y los resultados obtenidos son importantes para la toma de decisiones estratégicas y operativas en la vida útil de la mina (Castro et al., s. f.).

Algunos de los objetivos de la planificación minera incluyen:

- Optimización de recursos
- Maximizar la rentabilidad
- Minimizar riesgos
- Garantizar que las operaciones cumplan las normativas
- Sostenibilidad

Factores que afectan la planificación minera

- Condiciones geológicas y geotécnicas
- Precio de metales y minerales
- Normativas ambientales y sociales
- Capacidad de procesamiento
- Tecnología y maquinaria disponible

Las fases que contempla la planificación minera son:

- Exploración y evaluación del yacimiento
- Diseño del proyecto minero
- Planificación a largo plazo
- Planificación a mediano plazo
- Planificación a corto plazo

3.9 Beneficio

Es importante determinar el beneficio por bloque para poder determinar si el negocio minero a realizar es efectivamente rentable para las restricciones que indican los planificadores mineros. Cuando se habla del beneficio por bloque se hace referencia a la ganancia o utilidad generada por un bloque específico.

Luego para definir el beneficio por bloque, primero se realiza una identificación de los bloques, donde cada bloque representa una operación, proceso o corresponde a una unidad funcional, luego se asignan los costos y beneficios, donde se calculan el ingreso y costo asociado a cada bloque, para así determinar el cálculo del beneficio, tomando en consideración externalidades como lo son gastos que castiguen el ingreso, ya sean tiempos muertos o costos de traslado. Para esto, se imponen parámetros económicos que pueden o no variar en el tiempo, que están asociados a diferentes actividades mineras. Para calcular este beneficio por bloque se utiliza la siguiente ecuación la cual podemos separar en 2 partes donde tenemos:

$$Bb = \text{Beneficio} - \text{Costo} \quad (1)$$

$$\text{Beneficio} = M * [(P_{I2} * L_{I2} * R_{I2}) + (P_{NaNO3} * L_{NaNO3} * R_{NaNO3})] \quad (2)$$

$$Costos = M * [(C_m + D) + (Cp_{I_2} * L_{I_2} * R_{I_2}) + (Cp_{NaNO_3} * L_{NaNO_3} * R_{NaNO_3})] \quad (3)$$

Donde:

Bb = Beneficio del bloque

M = Tonelaje de bloque

P_{I_2} = Precio de venta del yodo

P_{NaNO_3} = Precio de venta del nitrato

R_{I_2} = Recuperación del yodo

R_{NaNO_3} = Recuperación del nitrato

L_{I_2} = Ley media del yodo

L_{NaNO_3} = Ley media del nitrato

Cm = Costo mina

Cp_{I_2} = Costo planta del yodo

Cp_{NaNO_3} = Costo planta del nitrato

D = Destape

El costo de mina del yodo depende de la ley de este, debido a que mientras más yodo se carga en la pila por tonelada de caliche más bajo es el costo de mina.

Costo de Destape:

El costo de destape hace referencia gasto incurrido para remover el material estéril que cubre el campo donde se encuentra el mineral. Este costo influye en la viabilidad económica de la explotación.

Este costo se define por la relación presente entre el estéril y el mineral, el tipo de material a remover, el método de explotación utilizado y la distancia de transporte.

3.10 Ley de corte

En minería la ley de corte o *Cut-off grade* se refiere al grado mínimo que debe tener el mineral o metal para que sea extraído económicamente. Todo el material que este sobre esta ley es

considerado mena y, por otro lado, el que este debajo se considera ganga o escombro (Freites, 2017).

En este caso, la ley de corte establece la cantidad de yodo o nitrato que genera una utilidad con la venta de este yodo o nitrato menos el costo de producción y extracción. Cuando esta ley es cero hace referencia a que el gasto se iguala a la utilidad.

3.11 Razón de costos

La razón de costos corresponde al análisis económico fundamental que permite determinar la rentabilidad de una operación minera. Se comparan los costos involucrados en el proceso de extracción con los ingresos que se esperan generar a partir de la venta del mineral. Tener un control de estos costos permite un buen margen de utilidad y también permite a las empresas aumentar su competitividad y rentabilidad, especialmente en los mercados globales (Castillo, s. f.).

Dentro de los componentes de la razón de costos se encuentran:

1. Costos operativos (OPEX)
 - a. Correspondientes a los costos recurrentes de la operación minera, siendo estos perforación y tronadura, carguío y transporte, trituración y molienda, lixiviación, flotación o fundición, mano de obra directa y gestión de residuos y cierre de faenas temporales.
2. Costos de capital (CAPEX)
 - a. Estos costos son los gastos iniciales y no recurrentes que se requieren para establecer la mina y mantener su funcionamiento. Nos referimos a la infraestructura, compra de quipos y maquinaria, exploración y desarrollo del yacimiento y montaje y construcción de la mina (Rayo, 2012).
3. Costos financieros
 - a. Referente a el pago de las deudas o créditos que se solicitaron para financiar la operación minera.
 - b. También abarca los gastos de seguros y consultorías.
4. Costos ambientales y regulatorios
 - a. Son los costos referentes al cumplimiento de normas ambientales, gestión de residuos, mitigación de impactos ambientales, costo de cierre de mina y rehabilitación del terreno.

Indicadores de la Razón de Costos

1. Costos totales por tonelada (CPT)

- a. Esta razón permite ver cuánto cuesta extraer, transportar y procesar una tonelada de mineral. Mientras más bajo el CPT se tiene una operación más eficiente. (Tigercat, 2024)
- b.

$$CPT = (OPEX + CAPEX)/(Toneladas de mineral extraído) \quad (4)$$

2. Costos C1, C2 y C3

- a. C1, corresponde a los costos directos de minería y procesamiento por unidad de producto.
- b. C2, corresponde a la suma de C1 más costos de administración y transporte.
- c. C3, corresponde a la suma de C2 más los gastos financieros y la depresión.

3. Razón de desmonte

- a. Esta razón nos entrega la proporción entre el volumen del material estéril y el del material útil. Una razón alto indica mayores costos operativos.

- b. $Razón\ de\ desmonte = \frac{Toneladas\ de\ estéril}{Toneladas\ de\ mineral} \quad (5)$

4. Margen de utilidad

- a. Permite medir la diferencia entre el precio de venta del producto y los costos operativos totales por unidad. Un mayor margen implica que hay una operación más rentable.
- b.

$$Margen\ de\ utilidad = \frac{Precio\ de\ Venta - Costo\ total\ unitario}{Precio\ de\ venta} * 100 \quad (6)$$

3.12 Modelo de bloques

Un modelo de bloques corresponde a una representación simplificada y abstracta de un yacimiento de mineral y sus alrededores, que se puede considerar como una pila de bloques o celdas generados por computadora que representan pequeños volúmenes de roca en un depósito, donde cada celda contiene información de interés que permite construir el modelo, como lo son la ley del depósito mineral, la densidad, y otros valores de entidades geológicas.

Características clave que presenta un modelo de bloques son que, se enfoca en los aspectos más importantes del yacimiento omitiendo detalles innecesarios, los bloques son independientes y pueden ser modificados o reemplazados sin afectar el resto del modelo, y que los bloques se encuentran conectados mediante líneas que indican el flujo de información (Trainings, 2022).

3.13 KPI

KPI o *Key Performance Indicator*, hace referencia a métricas que se utilizan para sintetizar la información relevante sobre la eficacia y productividad de las actividades que se llevan a cabo en un negocio. Estas permiten facilitar la toma de decisiones y ayudar a cumplir objetivos de un proyecto.

Estos KPI también son conocidos como indicadores de calidad o indicadores clave de negocio, los cuales pueden ser aplicados a cualquier área de negocio y sector productivo.

Las ventajas de los KPI son:

- Permiten obtener información valiosa y útil
- Permiten medir variables y resultados
- Facilitan el análisis de la información y los efectos de determinadas estrategias
- Permiten tomar decisiones oportunas

Los KPI también ofrecen una visión global de la situación, facilitando la identificación de los aspectos de mejora en los proyectos (Colaboración, 2017).

3.14 Análisis predictivo

El análisis predictivo es una técnica que utiliza datos históricos y algoritmos matemáticos para predecir resultados o comportamientos futuros. Las predicciones se basan en patrones, relaciones y tendencias que se logran identificar en los datos, y para lograrlas se utilizan modelos estadísticos (Timón, 2017).

Algunas de las técnicas más comunes en análisis predictivo son:

- Regresión: Estos modelos permiten predecir valores continuos.
- Clasificación: Estos predicen categorías.
- Series temporales: Analiza datos en el tiempo para lograr predecir tendencias.
- Árboles de decisión: Se utilizan para tomar decisiones predictivas.
- Redes neuronales: Buscan encontrar patrones complejos en grandes cantidades de datos.
- *Clustering*: Agrupa datos similares para descubrir patrones ocultos.

Ventajas del análisis predictivo:

- Mejora la toma de decisiones
- Aumenta la eficiencia operativa y reduce costos
- Identifica riesgos y oportunidades

Desventajas:

- Dependencia de los datos, si estos no son precisos y completos puede que la predicción no sea adecuada.
- La complejidad de comprender algunos modelos lleva a interpretaciones erróneas.
- Algunos modelos requieren de uso computacional avanzado.

3.14.1 Monte Carlo

La técnica de Monte Carlo utiliza números aleatorios para derivar el resultado de un proceso probabilístico, para esto utiliza entradas con distribuciones de probabilidad asignadas a un conjunto de variables, estas las corre a través de simulaciones que generan una distribución de probabilidad.

La simulación de Monte Carlo es una buena alternativa cuando se requiere evaluar proyectos con altos niveles de incertidumbre, esto porque al revisar múltiples escenarios, permite visualizar todas las posibles correlaciones y efectos conjuntos de las variables, entregando como resultado una distribución de probabilidad (Guardia et al., 2011).

4 METODOLOGIA

La metodología se compone de las siguientes etapas:

- I. Análisis del modelo de bloques y de las bases de datos entregados:
 - a. Limpieza de datos, se dejan fuera variables que no son relevantes para el estudio y se eliminan las filas y columnas que presentan datos erróneos, sin información y duplicados.
 - b. Se toman ciertas consideraciones y simplificaciones que permitirán un avance más fluido del trabajo.
 - c. Se identifican las variables categóricas y las continuas presentes en el modelo.
- II. Análisis del consumo de puntas
 - a. Analizar los diferentes KPIs proporcionados en la base de datos y seleccionar el que permita representar de mejor forma el consumo de puntas.
 - b. Se asignan durezas de 1 (blando) a 4 (duro) a cada fila de la base de datos, asociado al KPI de consumo de puntas seleccionado.
- III. Cálculo del Beneficio del Bloque
 - a. Con la herramienta Excel se realiza el cálculo del valor del bloque, el cual permite determinar el Beneficio total de este.
 - b. Con la base de datos histórica (datos de la extracción del pit) se determina un costo asociado a la dureza, con la cual se modifica el valor del costo mina.
 - c. Se calcula un nuevo Beneficio asociado a un nuevo costo de mina y se compara con el Beneficio real.
 - d. Se calculan las diferencias porcentuales entre el costo de mina utilizado actualmente y los modificados.
- IV. Proyecciones
 - a. Mediante simulaciones de Monte Carlo, se realiza un análisis de probabilidad del costo de puntas para distintos escenarios.
 - b. Realizar un ejercicio de proyección para estimar el costo y la cantidad de puntas requeridas según cada nivel de dureza del terreno.
- V. Análisis y comparación de resultados
 - a. Analizar los resultados obtenidos y determinar si es rentable realizar modificaciones en la planificación minera para aumentar el beneficio.

- b. Validar con datos de prueba que la distribución de durezas concuerde con la información entregada por el indicador de productividad.
- c. Verificar que las proyecciones del gasto de puntas y los costos asociados sean consistentes con la información proporcionada por la empresa, y comparar el análisis de puntas realizado por la empresa con los resultados obtenidos de las proyecciones desarrolladas.

VI. Conclusiones y Recomendaciones

5 DESARROLLO

I. Análisis de modelo de bloques

- a. La limpieza de datos se realizó para un modelo de bloques de un pit y dos bases de datos que muestran datos reales de extracción de material. Primero se dejaron fuera las entradas que no presentaban información, luego los erróneos y finalmente se utilizaron gráficos de cajas y bigotes que permitieron dejar fuera del estudio los valores atípicos.
- b. En conjunto con la primera limpieza, también se hizo una selección de las variables más importantes que se ajustan al estudio a realizar, y así simplificar el trabajo.

Tabla 5: Variables utilizadas del modelo de bloques.

Variables utilizadas del MB	
xc	Coordenadas
yc	
zc	
xinc	Ancho bloque
yinc	Largo bloque
zinc	Alto bloque
volume	Volumen
i2 ppm	Leyes
nano3 %	
density	Densidad
cod_dure	Dureza

Tabla 6: Variables relevantes de la base de datos.

Turnos	Indica si el trabajo se realizó en turno de día (A) o de noche (C)
Proveedor	Muestra que puntas se utilizaron en el turno según su marca
Valor US\$	Este corresponde al precio de cada punta
Puntas	Es la cantidad de puntas utilizadas (gastadas) en un turno
Horas corte	Indica cuántas horas estuvo trabajando el operador
Metros Lineales	Muestra los metros que avanzo el operador
Tonelaje	$Mtros\ lineales * Espesor * 2.1 * 4.35$
Ton/Horas	$\frac{Tonelaje}{Hrs\ de\ corte}$
Puntas/Horas	$\frac{Puntas}{Hrs\ de\ corte}$
Ton/Puntas	$\frac{Tonelaje}{Puntas}$
Dólar/Ton	$\frac{Puntas * Valor\ US\$}{Tonelaje}$

Cantidad de datos válidos de cada base de datos

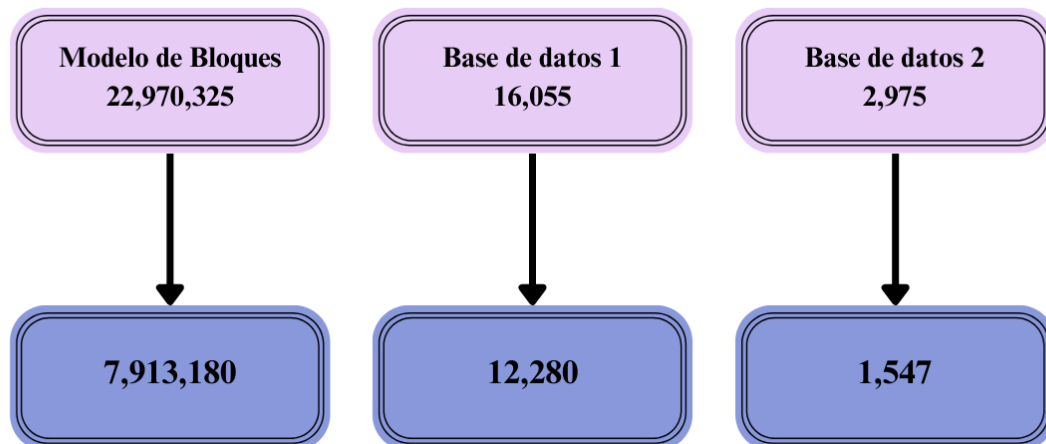


Figura 8: Resultado de la limpieza de datos.

- c. De las variables importantes se pueden identificar las categóricas y las continuas.

Tabla 7: Variables que componen la base de datos.

Variables Categóricas	Dureza, Tonelaje, Puntas
Variables Continuas	Ton/Puntas, Puntas/Hrs dólar/Ton, Ton/Hrs

II. Análisis del consumo de puntas

- a. Para comenzar primero se analizan los KPI o indicadores de productividad que utiliza la empresa y se escoge el que se ajuste de mejor forma al estudio a realizar.

Tabla 8: KPIs o indicadores utilizados por la empresa.

KPI	¿Qué indica?
Ton/Puntas	Indica cuanto tonelaje se extrajo por cada punta gastada
Puntas/Horas	Indica la cantidad de puntas gastadas por hora
Ton/Horas	Indica cuanto tonelaje fue extraído por cada hora

Se determina que el indicador que más se adecúa a lo que busca este estudio es el de Ton/Puntas, ya que representa mejor de mejor forma el consumo de puntas. Sin embargo, este indicador también se utiliza en función de los otros para efectos de análisis.

- b. Luego para asignar los rangos de dureza, se parte con la premisa de que a medida que el suelo este más duro habrá un menor tonelaje extraído y un mayor gasto de puntas, por otro lado, cuando el suelo este mas blando habrá un mayor tonelaje extraído y un menor gasto de puntas. Para verificar esta premisa se analiza el KPI escogido y se construyen los siguientes gráficos:

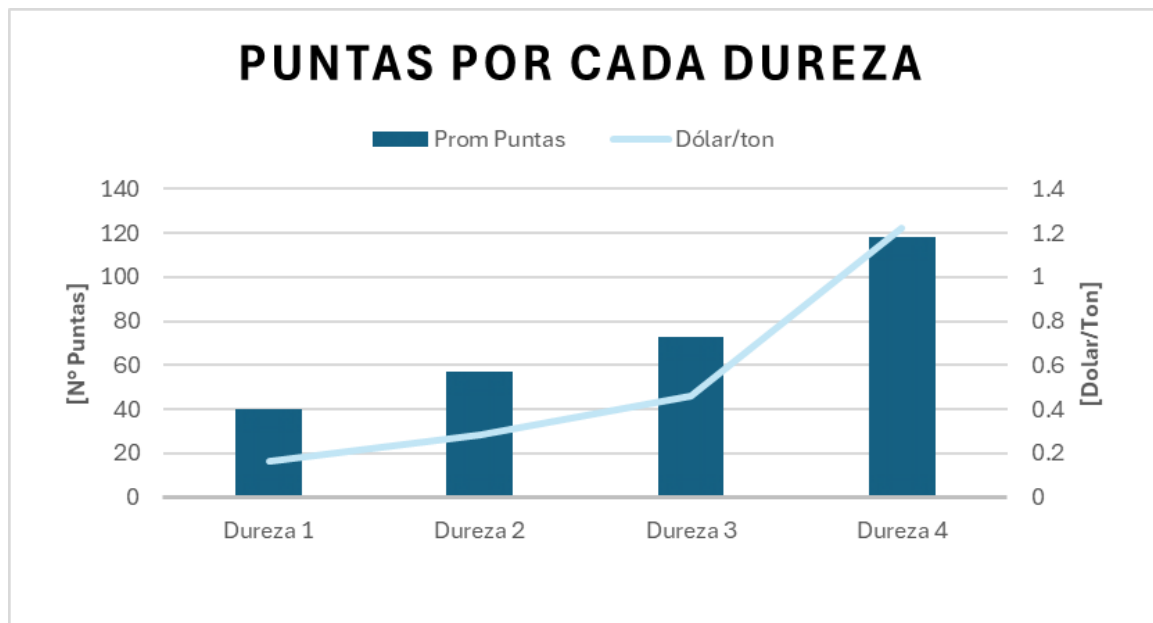
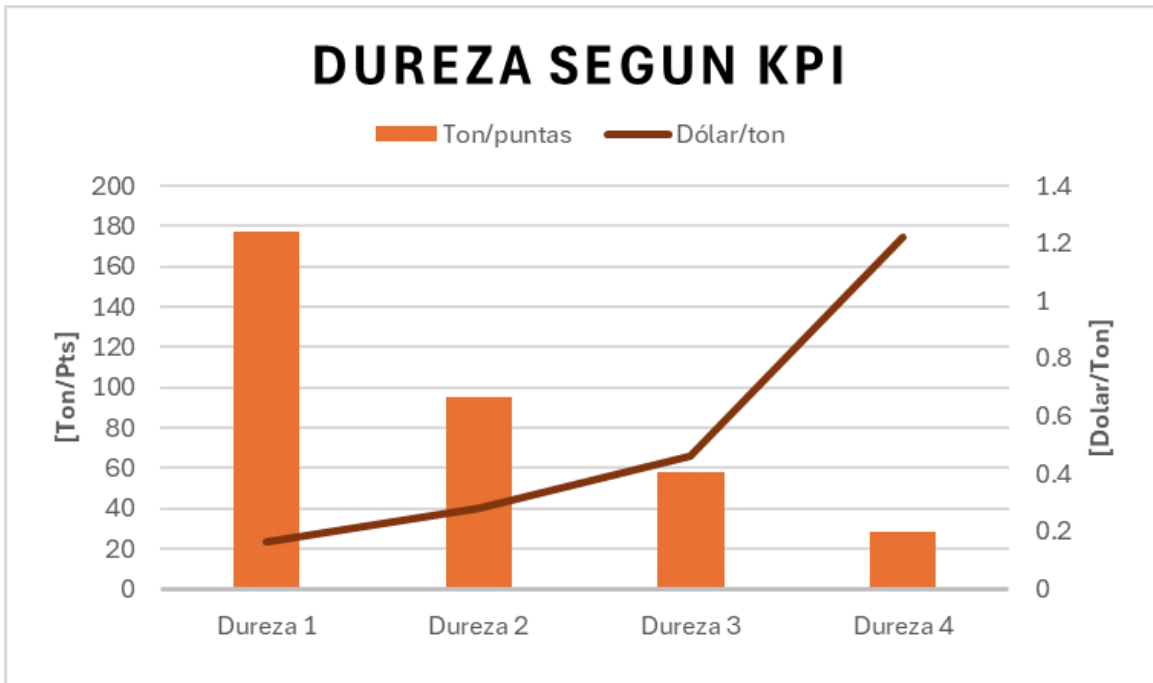


Figura 9: Gráfica superior permite visualizar la cantidad de Ton/Puntas para cada dureza y la gráfica inferior muestra las puntas que se utiliza en promedio por cada dureza según el indicador de tonelaje/puntas.

De las gráficas se entiende que la premisa del estudio es correcta y se puede continuar con las siguientes etapas.

III. Beneficio del bloque

- a. Para calcular el beneficio del bloque se utiliza la herramienta Excel en conjunto con la ecuación 1 y las siguientes variables fijas:

Tabla 9: Variables fijas para el cálculo del valor del bloque, datos entregados por SQM.

Variables	Unidad	Valor
Precio Yodo	[USD/Ton]	55,000
Precio Nitrato	[USD/Ton]	262.9
Costo Mina ROM	[USD/Ton]	5.6
Costo Planta Yodo	[USD/Ton]	8,702
Costo Planta Nitrato	[USD/Ton]	118
Costo Destape	[USD/Ton]	1
Recuperacion Nitrato	[%]	19
Recuperacion Yodo	[%]	65

- b. A partir del análisis de los indicadores de productividad, que incluye información clave para determinar el tipo de dureza del suelo, y considerando la relación US\$/Ton, se ha elaborado la Tabla 10 que proporciona valores que permiten ajustar los costos asociados a la operación minera:

Tabla 10: Variación del precio y la alteración al costo mina relacionado a la dureza del suelo.

Dureza	Ton/puntas	Dólar/ton	Modificación CM
Dureza 1	177.159	0.166	-0.368
Dureza 2	95.628	0.282	-0.251
Dureza 3	57.999	0.464	-0.060
Dureza 4	26.345	1.222	0.688
Promedio	-	0.536	-

- c. A continuación, con la alteración al costo mina se calcula nuevamente el beneficio del bloque y se compara con el beneficio obtenido previamente.
- d. En esta misma línea de estudio, también se calcula la diferencia porcentual del costo mina, dejando fuera los costos planta, esto porque los costos planta son mas significativos que los mina, y así se puede analizar si la dureza del suelo afecta en el departamento de gestión mina. Para esto se utilizan los costos de mina modificados plasmados en la Tabla 10 y el costo de mina fijo utilizado por la empresa.

IV. Proyecciones

- a. Para implementar un modelo probabilístico que permita predecir el gasto de puntas en función de la dureza del suelo se siguen los siguientes pasos:
 1. Analizar cómo se distribuyen los valores de Ton/puntas para cada nivel de dureza, durante que turno de trabajo y con qué tipo de puntas (marca). Se tienen 24 escenarios.

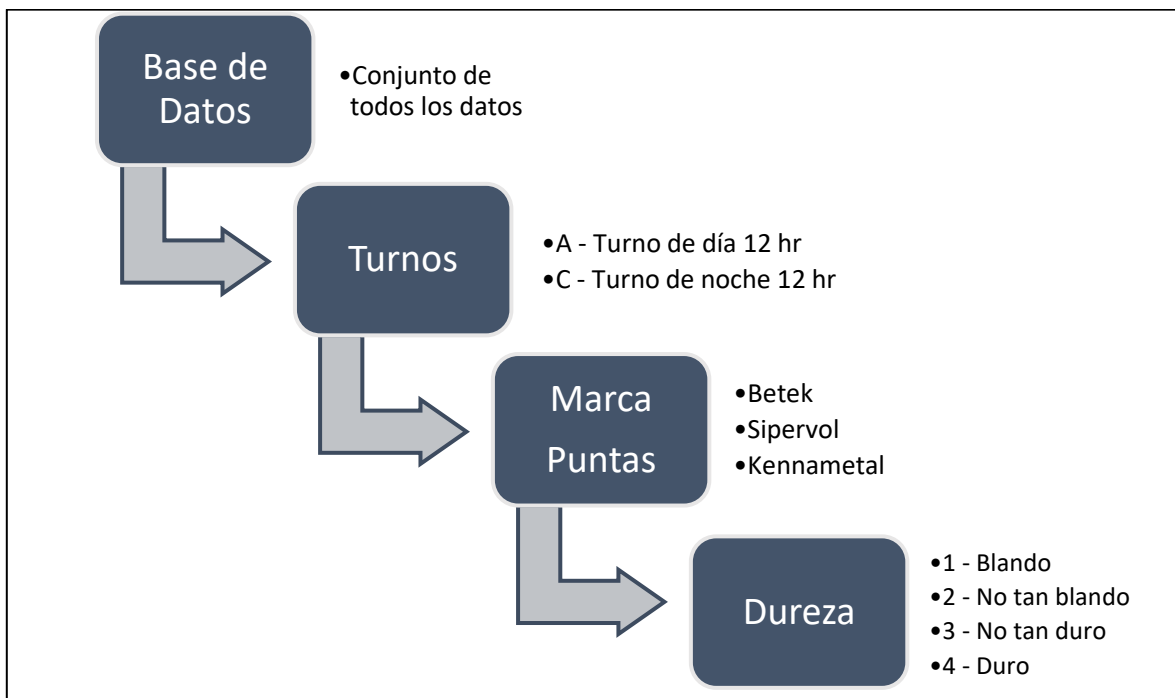


Figura 10: Clasificación de datos.

Tabla 11: Escenarios a estudiar.

Turno	Dureza	Marca	Escenarios
A	1	Sipervol	1
		Kennametal	2
		Betek	3
	2	Sipervol	4
		Kennametal	5
		Betek	6
	3	Sipervol	7
		Kennametal	8
		Betek	9
	4	Sipervol	10
		Kennametal	11
		Betek	12
C	1	Sipervol	13
		Kennametal	14
		Betek	15
	2	Sipervol	16
		Kennametal	17
		Betek	18
	3	Sipervol	19
		Kennametal	20
		Betek	21
	4	Sipervol	22
		Kennametal	23
		Betek	24

- Luego para cada escenario se determinan los parámetros utilizados para la confección de las simulaciones.

Tabla 12: Ejemplo de parámetros utilizados para el escenario 18.

Escenario 18 - Turno C - Betek		
Dureza	2	-
Media	4.6	Ton/Pts
Desviación estándar	0.15	Ton/Pts
Costo unitario punta	27.12	US\$

3. A continuación, tomando como base los parámetros previamente mencionados se calculan valores aleatorios para las simulaciones de Monte Carlo y se confeccionan histogramas.

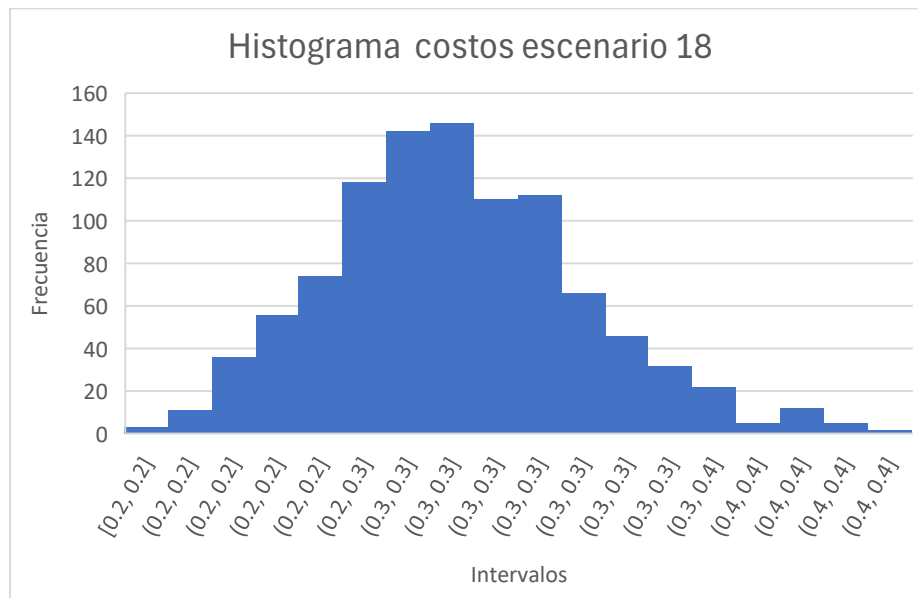


Figura 11: Ejemplo de histograma para el escenario 18.

4. Con las simulaciones de Monte Carlo se establecen los pronósticos de gasto de puntas y costos:
- Para cada escenario, se calcula el promedio de los datos de Ton/Puntas, el costo, y sus respectivos percentiles 10 y 90.

Tabla 13: Ejemplo Costo y Ton/Puntas simulado, escenario 18.

Costo simulado		
Promedio	0.28	[dólar/Ton]
P10	0.23	[dólar/Ton]
P90	0.33	[dólar/Ton]
Ton/Puntas simulado		
Promedio	99.13	[Ton/Puntas]
P10	82.42	[Ton/Puntas]
P90	116.76	[Ton/Puntas]

5. Luego se calcula el costo total y se analiza cómo se distribuye este gasto en función de la dureza, finalmente para determinar los costos futuros se utiliza un intervalo de confianza.
- b. Para construir las proyecciones del gasto de puntas, se consideró un total de 1,800,000 de toneladas extraídas anualmente, distribuidas según la proporción de durezas del suelo representadas en el modelo de bloques. Esto proporciona una estimación del porcentaje de suelo correspondiente a cada nivel de dureza. Cabe destacar que este ejercicio se realiza bajo la premisa de que las características del suelo y sus durezas se mantendrán constantes a lo largo de toda la explotación del pit.

PORCENTAJE DE DUREZAS EN MB

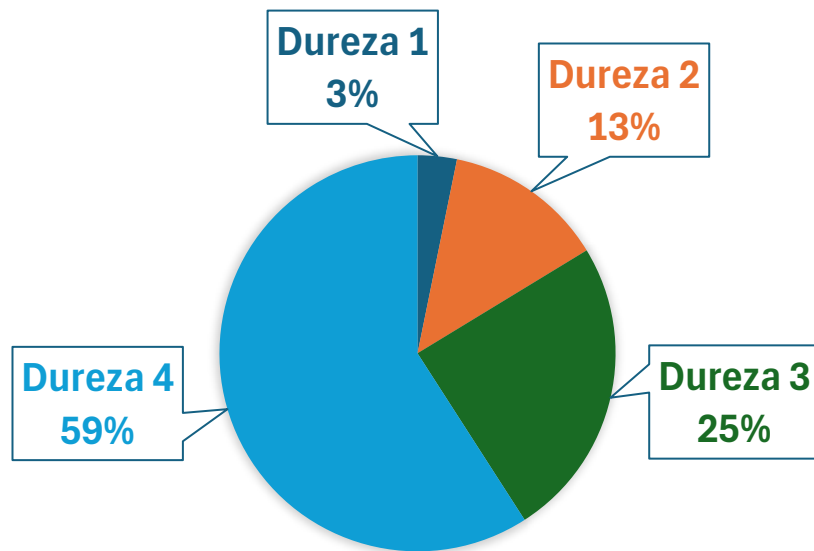


Figura 12: Representación porcentual de las durezas en el modelo de bloque.

6 RESULTADOS

a. Para determinar el beneficio:

En primer lugar, utilizando la ecuación 1 junto con las variables fijas presentadas en la Tabla 9, y considerando los datos en su forma original, se calcula un beneficio inicial que representa el cálculo realizado por la empresa. Posteriormente, este resultado se compara con un segundo cálculo del beneficio que incorpora las modificaciones al costo de mina en función de la dureza representada en el modelo. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 14: Resultados del cálculo del beneficio.

Cálculo Beneficio	Valor
Sin modificar	\$ 807,131,730
Modificado	\$ 806,918,421
Diferencia	\$ -213,310
Diferencia porcentual	-0.03%

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 14, se observa que la modificación del costo mina genera una reducción en el beneficio en un -0.03%. Sin embargo, esta variación no es lo suficientemente significativa como para justificar ajustes en la planificación minera a nivel global. Por esta razón, se procede a analizar la diferencia en el contexto de la gestión minera:

Tabla 15: Diferencia costo mina.

Dureza	Costo mina modificado	% Diferencia
Dureza 1	5.2321	-7%
Dureza 2	5.3488	-4%
Dureza 3	5.5405	-1%
Dureza 4	6.2882	12%

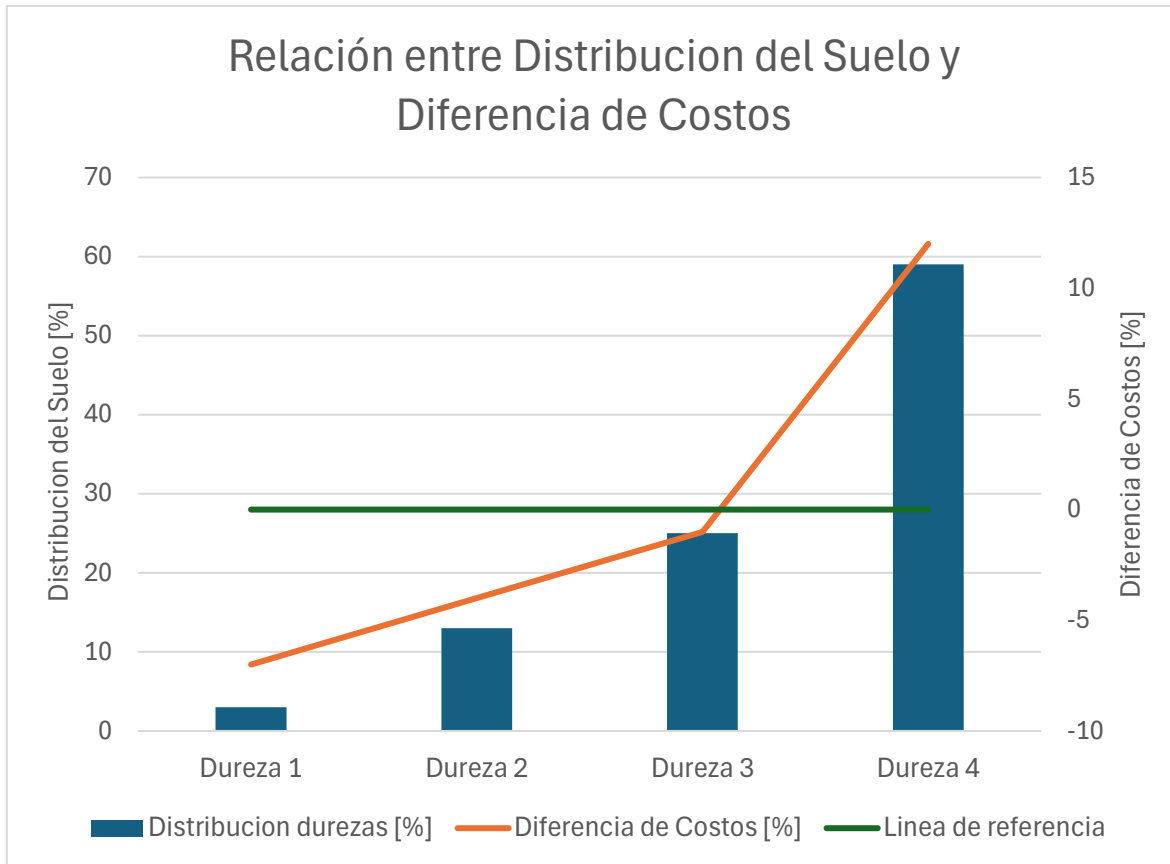


Figura 13: Diferencias de costos porcentuales para las distintas durezas.

De los resultados obtenidos en la Tabla 15 y la Figura 13, se puede interpretar que dado que la mayor proporción del suelo corresponde a dureza 4 (59%), el incremento de costos asociado a esta dureza tiene un impacto significativo en la operación. Esto evidencia que el departamento de gestión mina está subestimando el costo real, especialmente en las zonas con mayor dureza del suelo.

Del gráfico se observa que las durezas más frecuentes, como la **dureza 4**, generan sobrecostos significativos en comparación con el promedio. Esto resalta la necesidad de evaluar estrategias específicas para optimizar las operaciones en suelos predominantemente duros.

Por otro lado, las durezas menos frecuentes, como la **dureza 1**, aunque generan costos más bajos, tienen un impacto limitado en el costo total de la operación debido a su baja representación en la distribución del suelo.

- b. Para el análisis probabilístico se utilizaron los 24 escenarios mencionados previamente en la Tabla 11.

Teniendo en cuenta la clasificación, se confeccionaron histogramas para cada dureza de cada marca de puntas gastadas por turno, obteniendo un total de 24 histogramas. Al analizarlos se determina que los datos se distribuyen de forma lognormal, esto debido a:

- Los datos muestran una variación amplia.
- Los valores tienden a agruparse hacia la parte baja del rango (cerca del mínimo) con pocos valores altos extremos.
- Presentan asimetría positiva, representado en la distribución cuando este tiene una cola hacia la derecha, con algunos valores muy altos, pero no valores negativos.
- Los datos de la distribución no presentan datos negativos, y la distribución lognormal no tiene valores menores o iguales a cero.

Luego se evalúa la distribución implementada mediante regresiones, primero para el conjunto total de datos y después para 6 escenarios, siendo estos los que están delimitados por la marca de puntas utilizada (ver anexos). Para el conjunto de datos se encuentra que el ajuste entregado por el error cuadrático medio logra explicar la variación de Ton/Puntas por la dureza y también corrobora que a medida que aumenta la dureza del suelo aumenta el gasto de punta (ver anexos).

- c. Para avanzar con el análisis predictivo, se asumió como premisa que anualmente se extraen 20 millones de toneladas de material. Combinando esta premisa con los costos por tonelada obtenidos a partir de las simulaciones de Monte Carlo para cada escenario, se desarrollaron las proyecciones del gasto de puntas y sus costos asociados.

Tabla 14: Costos por toneladas obtenidas con Monte Carlo para cada escenario.

Costo por tonelada simulado							
Dureza	Sipervol - A	Sipervol - C	Kennametal - A	Kennametal - C	Betek - A	Betek - C	Unidad
1	0.18	0.19	0.20	0.19	0.20	0.20	[US\$/Ton]
2	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	[US\$/Ton]
3	0.50	0.51	0.54	0.53	0.50	0.48	[US\$/Ton]
4	1.05	1.08	1.23	1.17	1.24	1.13	[US\$/Ton]

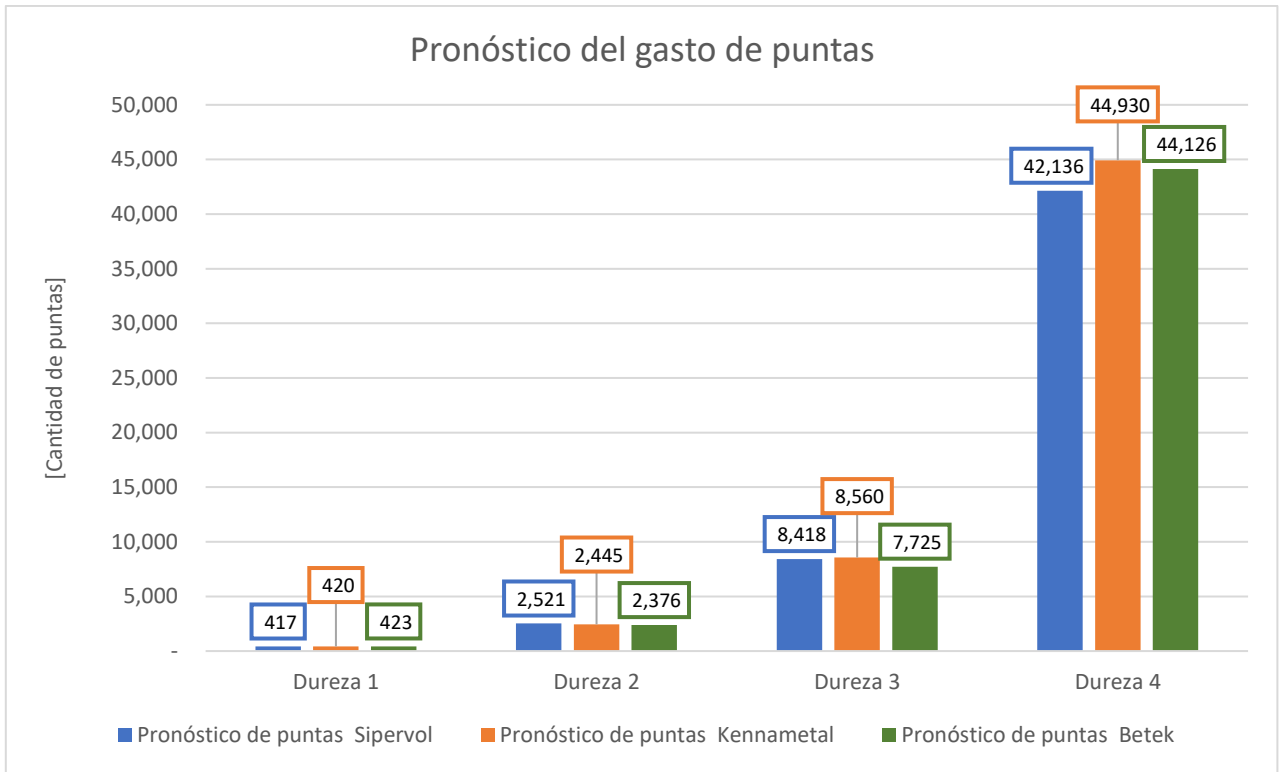


Figura 14: Pronóstico del gasto de puntas.

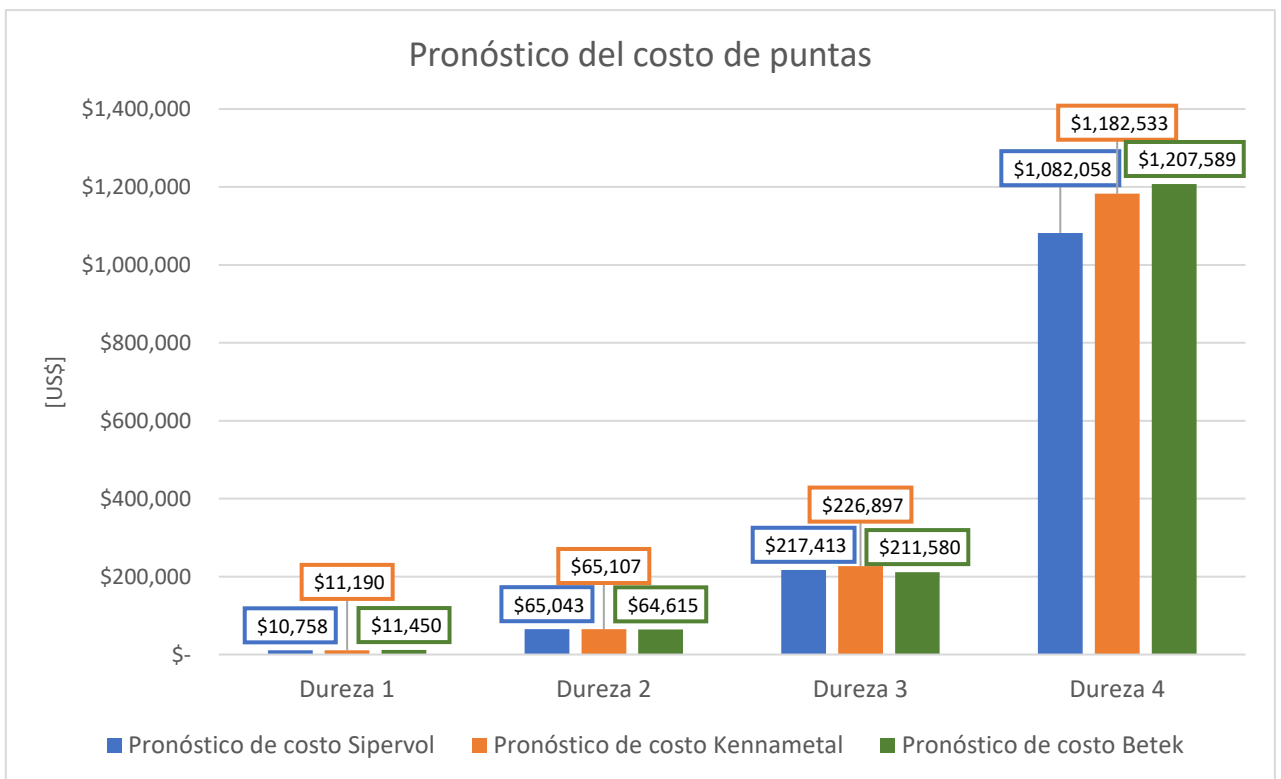


Figura 15: Pronóstico del costo según dureza.

De la Figura 14, se logra ver el incremento del gasto de puntas con la dureza, destacando que el gasto aumenta significativamente para todas las marcas a medida que aumenta la dureza. También, se logra ver que en general Betek presenta un mayor consumo de puntas en comparación con las otras marcas, en casi todos los niveles de dureza. Kennametal presenta un comportamiento intermedio y Sipervol es la que muestra un menor gasto de puntas para todas las durezas

Luego en la Figura 15, se ve como varia el costo de las puntas en función de la dureza, donde los costos aumentan considerablemente a medida que aumenta la dureza del suelo, evidenciando que la dureza del terreno tiene un impacto directo en el costo operativo.

Analizando por marcas:

- Betek presenta los costos más altos en todos los niveles de dureza, con una diferencia especialmente marcada en Dureza 4.
- Sipervol mantiene los costos más bajos, siendo la opción más económica en los cuatro niveles de dureza.
- Kennametal, aunque intermedio, tiene costos más cercanos a los de Sipervol en los niveles de dureza menores, pero tiende a acercarse a Betek en los niveles más altos.

En general, Sipervol se posiciona como la opción más económica, siendo potencialmente más eficiente en términos de costo-beneficio en terrenos menos exigentes.

Se añade al análisis se toman las proyecciones realizadas y los resultados obtenidos, en conjunto con un estudio de puntas realizado por la empresa.

Tabla 15: Estudio costo-eficiencia de puntas - SQM.

Marca	Rendimiento costo-eficiente
Sipervol	Presenta mejor rendimiento en zonas de menor dureza
Kennametal	Presenta mejor rendimiento en zonas de mayor dureza
Betek	A diferencia de las otras marcas tiene un costo más elevado con relación a su desempeño

De esta forma se obtiene, que Sipervol demuestra ser la opción más costo-eficiente en zonas de menor dureza, presentando un menor gasto de puntas. Kennametal destaca en zonas de mayor dureza manteniendo un equilibrio entre su costo y desempeño, con un gasto de puntas intermedio y costos competitivos en relación con las demás marcas. Betek, no muestra una ventaja clara en cuanto a costo-eficiencia en relación con su desempeño, por lo que su uso podría ser menos rentable.

En terrenos con menor dureza Sipervol es la opción mas optima para reducir costos operativos sin comprometer el rendimiento, Kennametal se puede ver como una buena opción para terrenos más exigentes debido a que en la realidad esta es la que ofrece una mejor relación costo-eficiente, comportamiento que no se logra evidenciar del todo en las simulaciones, esto puede ser por la representatividad que presentan los datos originales. Por otro lado, el uso de la marca Betek se podría justificar en casos específicos donde su desempeño en terrenos duros ofrezca beneficios adicionales, como lo son mayor durabilidad, mayor eficiencia en la extracción o disminución de interrupciones operativas, aspectos que no se reflejan directamente en los costos calculados del análisis.

7 CONCLUSIONES

1. Del análisis de datos, se logró determinar las variables que permiten construir escenarios para evaluar el beneficio del bloque. También se seleccionó la variable Ton/Puntas, la cual corresponde al indicador que representa de mejor forma el gasto a estudiar, sin embargo, este KPI se utiliza en función del resto de indicadores.
2. Del análisis de los resultados del cálculo del beneficio, se llega a una diferencia de -0.03%, se concluye que esta disminución del beneficio no es significativa como para realizar modificaciones a la planificación. Por otro lado, para el área de gestión de mina, las diferencias encontradas en el costo mina llegan hasta un 12% más en relación con el valor de costo mina utilizado, evidenciando una subestimación del costo real de la operación minera en los suelos duros, resaltando la necesidad de optimizar la operación en estas zonas principalmente.
3. Se logra generar proyecciones del gasto y del costo de puntas para las distintas durezas representadas en el modelo. también se puede concluir que la dureza es un factor relevante en la gestión, debido al impacto que genera en el gasto y costos de puntas, es por esto, que optimizar la selección de marcas según el nivel de dureza puede contribuir a una gestión más eficiente de los costos operativos.

8 RECOMENDACIONES

1. Como recomendación, la empresa podría utilizar la información de dureza del suelo calculada en laboratorio, para delimitar en el pit las zonas que presentan mayor y menor dureza, de esta forma el operador estaría más preparado al momento de utilizar los equipos de corte, prolongando en cierta medida la vida útil de las puntas utilizadas.
2. Al momento de realizar las pruebas de puntas, tener en cuenta las zonas de durezas más altas, y probar ahí cada marca, así se logra determinar cuales son mas resistentes al impacto y abrasión del suelo.

BIBLIOGRAFIA

- ASALE, R.-, & RAE. (s. f.). *Caliche* | *Diccionario de la lengua española*. «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Recuperado 25 de junio de 2024, de <https://dle.rae.es/caliche>
- BETEK. (s. f.). *BETEK, LÍDER EN PICAS DE CARBURO DE TUNGSTENO* | *Maquinaria Alfo, S.A. de C.V.* Recuperado 29 de julio de 2024, de <https://www.alfocom.mx/blog/1453-betek-lider-en-picas-de-carburo-de-tungsteno>
- Castillo, E. (s. f.). *Caracterización de los costos de la gran minería del cobre*.
- Castro, R., Orellana, L. F., Suzuki, K., Vallejos, J., & Yarmuch, J. L. (s. f.). *Diseño y Planificación Minera—Departamento de Ingeniería de Minas—FCFM - Universidad de Chile*. Ingeniería de minas. Recuperado 20 de octubre de 2024, de <http://minas.uchile.cl/investigacion/lineas-de-investigacion/disenoy-planificacion-minera>
- Colaboración. (2017, septiembre 29). *KPI's ¿Qué son, para qué sirven y por qué y cómo utilizarlos?* <https://blog.es.logicalis.com/analytics/kpis-que-son-para-que-sirven-y-por-que-y-como-utilizarlos>
- Finning, K. (s. f.). *Punta de fresado KENNAMETAL*. Finning. Recuperado 4 de julio de 2024, de https://www.finning.com/es_AR/campaigns/construccion/punta-de-fresado-kennametal-ml.html
- Freites, J. G. (2017, agosto 12). *Ley de corte / Cut-off grade*. *Cursos en Geología y Minas*. <https://www.cursosgeomin.com.ve/ley-corte-cutoff-grade/>
- Guardia, V. M. D., Torres, M. C., Arenas, C. E. V., Castro, R. H., Toro, G. M., & Mendoza, O. B. (2011). ANÁLISIS DE RIESGO Y SIMULACIÓN DE MONTE CARLO EN

- LA VALORACIÓN DE PROYECTOS– APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA DE LOS HIDROCARBUROS. *Fuentes, el reventón energético*, 9(2), Article 2.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/2609>
- Ingeoexpert. (2018, enero 19). Minería a cielo abierto: Ventajas y características. *Ingeoexpert*. <https://ingeoexpert.com/2018/01/19/mineria-cielo-abierto/>
- Millas, D. I. G. (2000). *LA INDUSTRIA DEL YODO EN CHILE: PROCESOS, PRODUCCION, MERCADO Y*
- PETROENERGÍA. (2022, mayo 16). *APLICACIÓN DE MINERALES EN BASE A SU DUREZA*. Petroenergía. <https://www.petroenergia.info/post/aplicación-de-minerales-en-base-a-su-dureza>
- Rayo, J. (2012, noviembre 21). *VALORIZACIÓN DE CAPEX Y OPEX EN PROYECTOS MINEROS*. SONAMI. <https://www.comisionminera.cl/wp-content/uploads/2023/03/6-Valorizacion-Capex-Opex-Juan-Rayo-JRI.pdf>
- SONAMI. (2014, mayo). *Guía 4. Perforación y Tronadura*. <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/03/6.perforacion-y-tronadura.pdf>
- SQM. (s. f.-a). *Caliche*. El caliche. Recuperado 21 de mayo de 2024, de <https://www.sqm.com/sqmeninfografias/caliche.html>
- SQM. (s. f.-b). Nuestras Operaciones | Nosotros | SQM Iodine. *SQM YODO*. Recuperado 13 de junio de 2024, de <https://sqmiodine.com/nosotros/nuestras-operaciones/>
- SQM. (s. f.-c). Producción Única a Partir del Caliche | Sustentabilidad | SQM Iodine. *SQM YODO*. Recuperado 1 de junio de 2023, de <https://sqmiodine.com/sustentabilidad/produccion-unica-a-partir-del-caliche/>
- Tigercat. (2024). Costo por tonelada métrica: Notas técnicas. *Tigercat*. <https://www.tigercat.com/es/costo-por-tonelada/>

- Tima. (2021, marzo 23). Componentes de carburo de tungsteno para equipos de perforación y minería. *Eurobalt Ingeniería*. <https://eurobalt.net/es/blog/2021/03/23/tungsten-carbide-components-for-drilling-and-mining-equipment/>
- Timón, E. (2017). *Análisis predictivo: Técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo—Herramientas Open Source que permiten su uso*.
https://scholar.google.cl/scholar_url?url=https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/59565/6/caresptimTFG0117mem%25C3%25B2ria.pdf&hl=es&sa=X&ei=0R9DZ_aUGcCI6rQPnq62wQE&scisig=AFWwaeYeV-L2fPuCy479EdHKaDmG&oi=scholar
- Trainings, C. W. C. (2022, abril 30). ¿Qué son los modelos de bloques en minería? *Minería Space*. <https://mineria.space/que-son-los-modelos-de-bloques-en-mineria/>
- Vermeer. (s. f.). *Vermeer T1655III Terrain Leveler Surface Excavation Machine*. Vermeer.
Recuperado 15 de agosto de 2023, de <https://www.vermeer.com/na/terrain-levelers/t1655iii-sem>
- W. Griem. (2009). *Colección virtual de minerales: Caliche, Nitratina*.
<https://www.geovirtual2.cl/Mineral/Caliche-Nitratina-01.htm>

9 ANEXO

Tabla 16: Variables presentes en las bases de datos.

PILA	Código de pila donde se está operando
FECHA	La fecha donde ocurrió el turno
SECTOR	Sector por trabajar, Pampa Hermosa
TURNO	Si el turno fue de día "A" o de noche "C"
PIT	Número del pit
CAPA	Que capa se estaba cortando
OPERADOR	Nombre del operador
HORÓMETRO INICIAL	Hora al iniciar el uso de la máquina
HORÓMETRO FINAL	Hora al terminar el uso de la máquina
HR. OP	Horas que trabajo el operador
PROVEEDOR	Marca de la punta utilizada
TIPO DE PUNTA	Modelo de la punta
VALOR US\$	Valor de la punta
PUNTAS	Cantidad de puntas gastadas
HRS CORTE	Horas efectivas de corte
Mt LINEAL	Metros avanzados
TONELAJE	Tonelaje extraído en el turno
TON/HRS	Cuánto tonelaje se extrajo por hora
PTS/HRS	Cuántas puntas se gastaron por hora
TON/PTAS	Cuántas toneladas fueron extraídas por punta
DOLR. /TON	Costo en dólares por cada tonelada extraída
% EFECT.	Porcentaje de efectividad del trabajo
ESPESOR	Espesor de corte
ANCHO DEL TAMBOR	Ancho del tambor
MTS/MIN	Metros avanzados por minuto

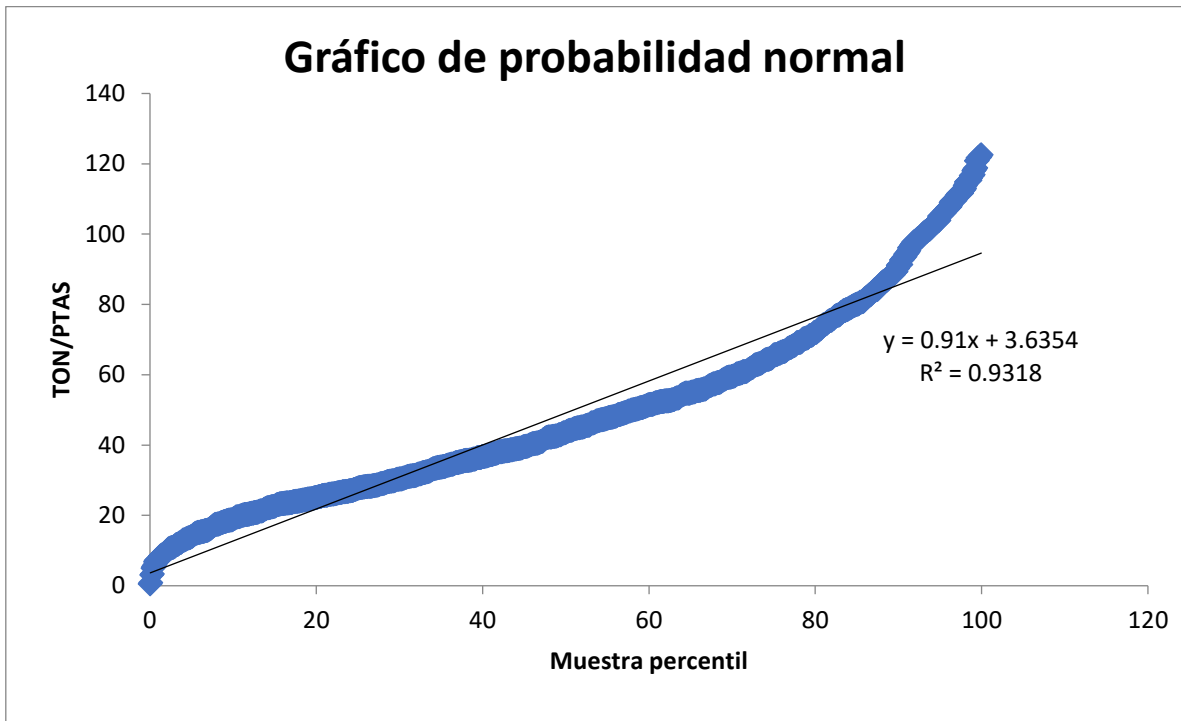


Figura 16: Regresión del conjunto total de datos.

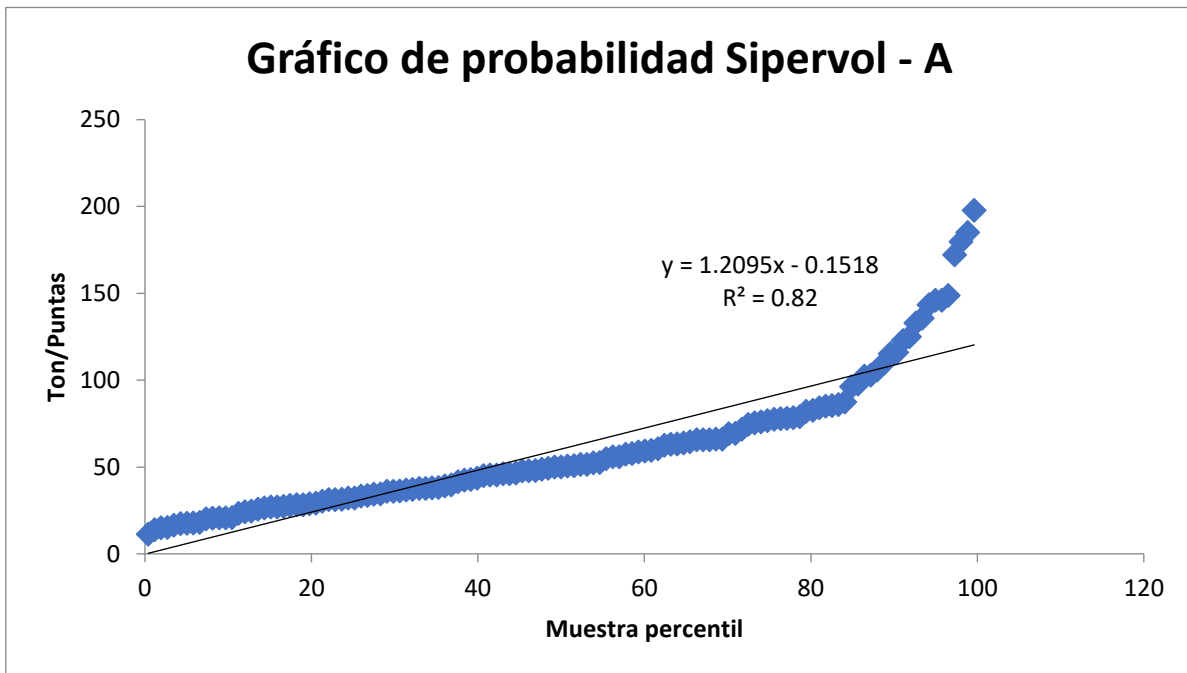


Figura 17: Regresión Turno A Sipervol

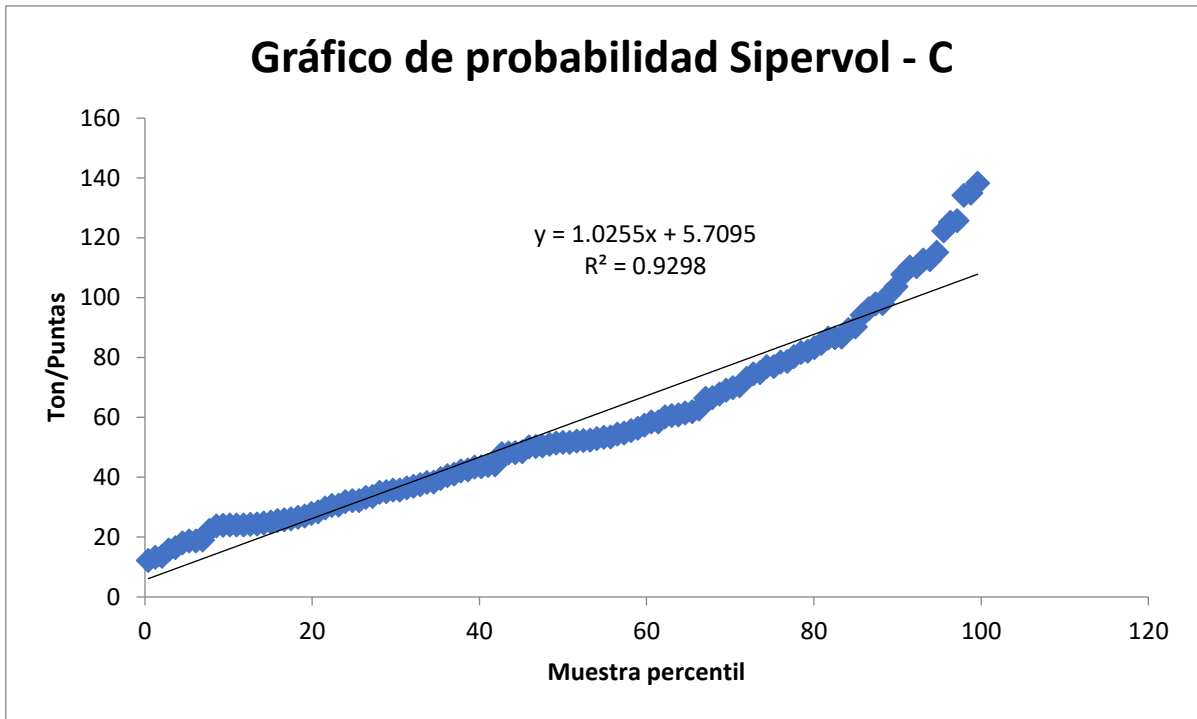


Figura 18: Regresión Turno C Sipervol

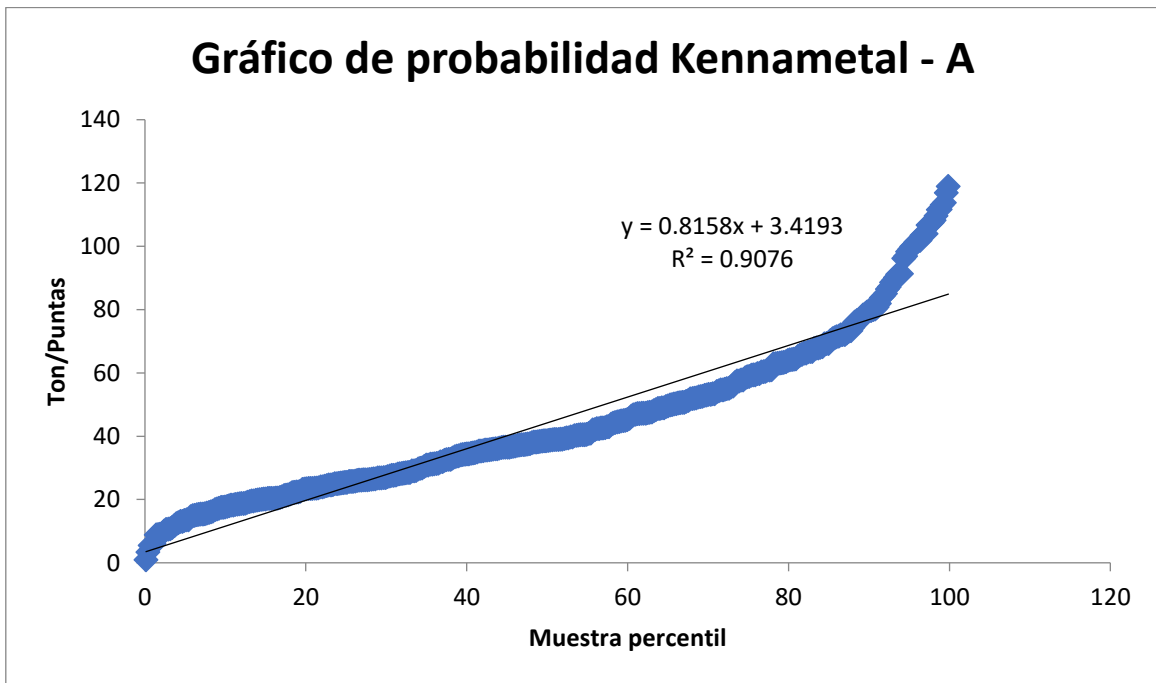


Figura 19: Regresión Turno A Kennametal

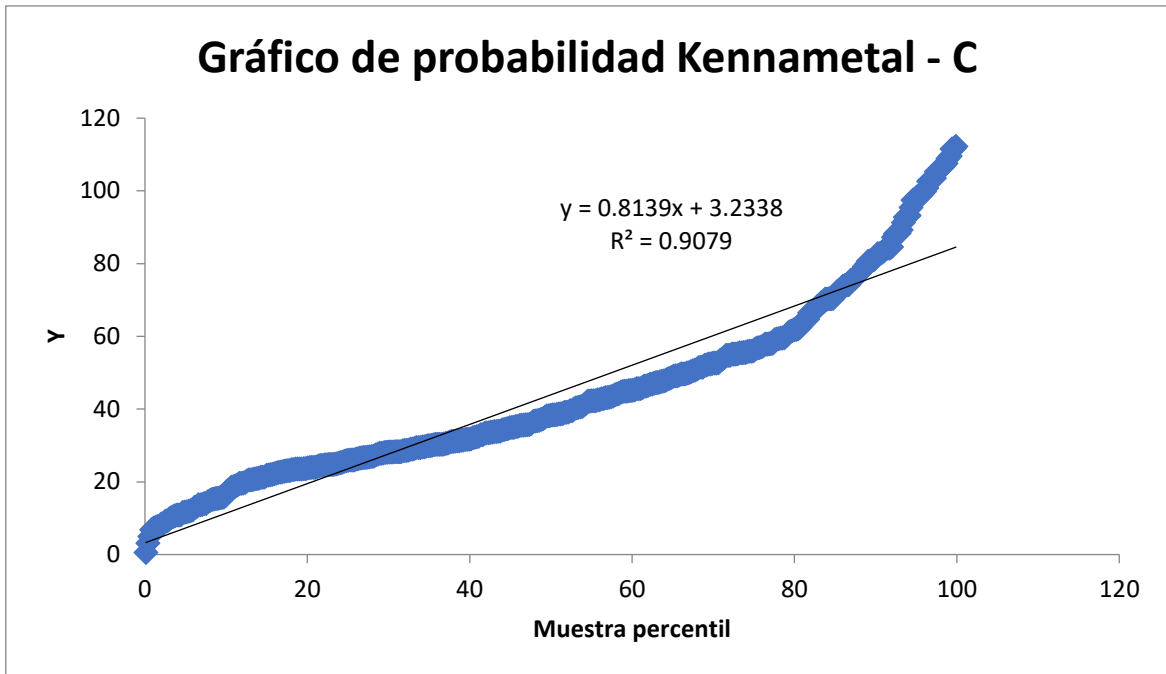


Figura 20: Regresión Turno C Kennametal

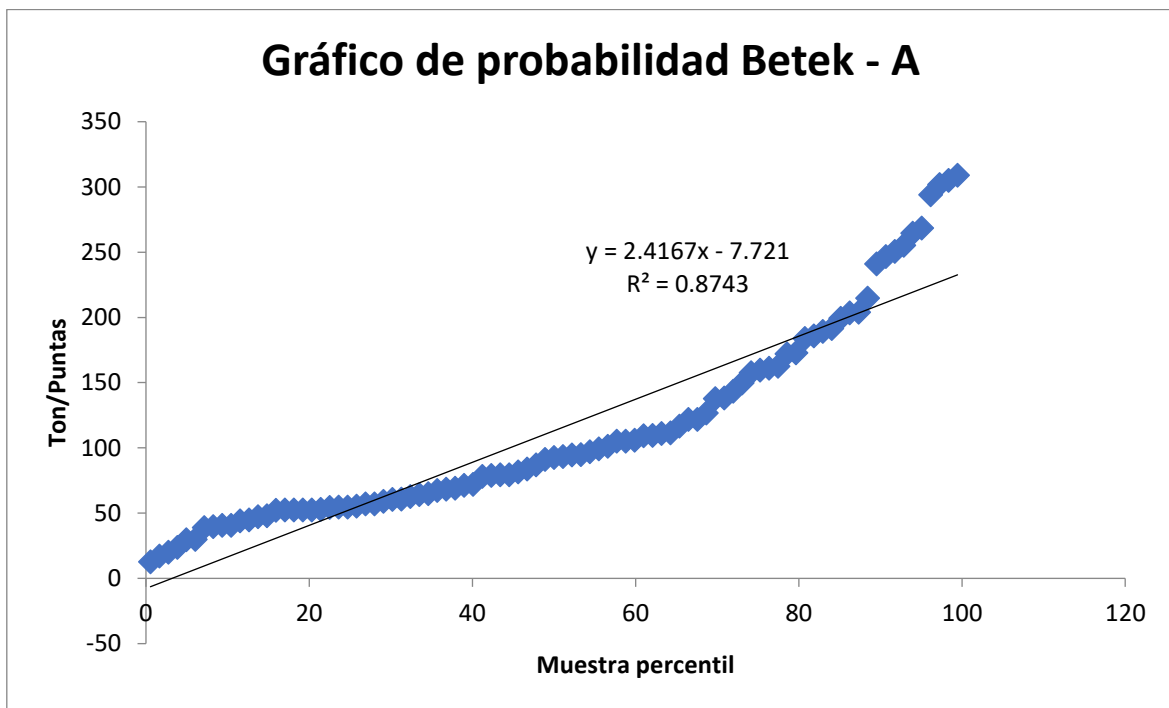


Figura 21: Regresión Turno A Betek

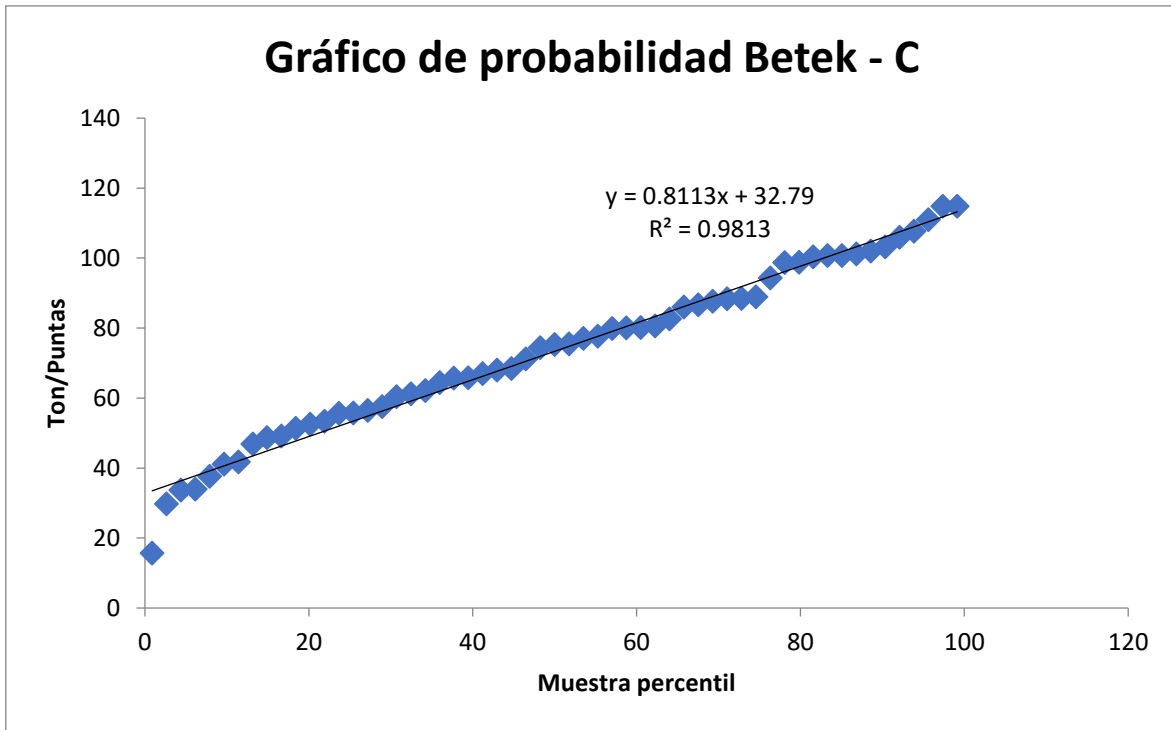


Figura 22: Regresión Turno C Betek

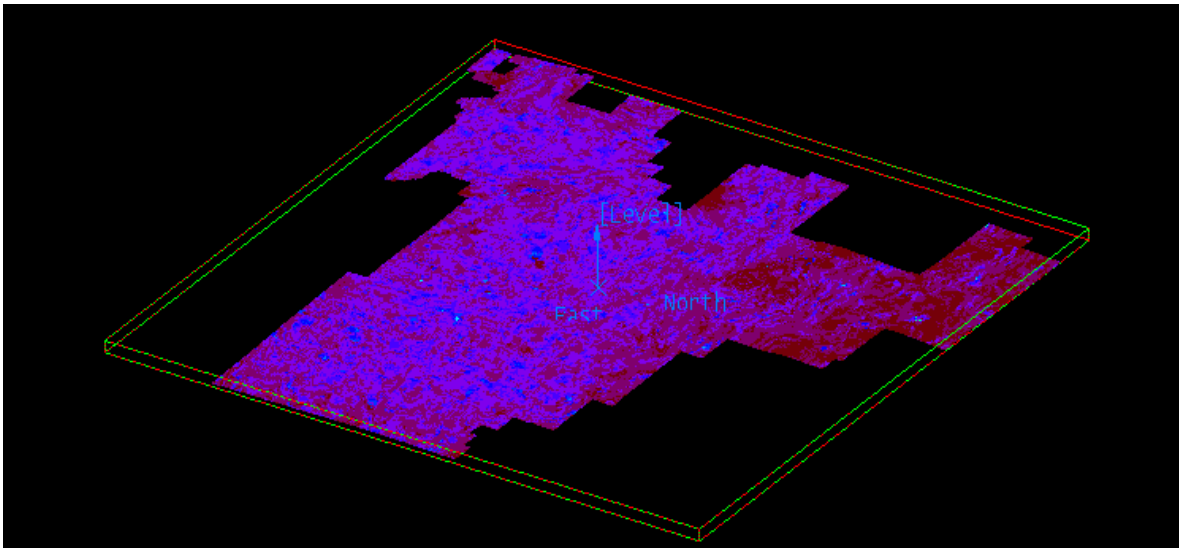


Figura 23: Representación del modelo de bloques en Vulcan.