



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE LANE PARA UNA ÓPTIMA PRODUCCIÓN DE MINERAL MAXIMIZANDO LA RENTABILIDAD EN UNA MINA DE COBRE A TAJO ABIERTO EN EL SUR DEL PERÚ, 2020”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Carlos Alberto Correa Vargas
Pamela Maribel Rivera García

Asesor:

Ing. Víctor Eduardo Alvarez León

Cajamarca - Perú

2021

DEDICATORIA

A nosotros mismos, por todas las cosas logradas, por tener la fuerza de voluntad suficiente para llegar hasta la meta trazada.

A nuestros padres por habernos guiado en todo este camino.

A nuestro hijo Caleb Correa Rivera, nuestra principal motivación, por haber sido la razón fundamental de que nos levantemos cada día para asistir a la Universidad y el esforzarnos por el presente y el mañana.

Pamela y Carlos

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la vida y por todos los conocimientos que hemos logrado adquirir a lo largo de nuestras vidas, lo cual nos han permitido llegar hasta aquí y saber que queremos buscar un futuro profesional prometedor.

A mi alma mater, la Universidad Privada del Norte, sede Cajamarca, por abrirnos sus puertas.

A nuestros padres por su apoyo incondicional en todo momento y por todas las esperanzas puestas en nosotros.

Pamela y Carlos

Tabla de contenido

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE TABLAS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	7
RESUMEN.....	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	18
2.2. Población y muestra	20
2.4. Procedimiento.....	21
CAPÍTULO III. RESULTADOS	24
3.1. Distribución Ley – Tonelaje y parámetros de diseño de la mina.....	24
3.2. Programa de producción obtenido al calcular la LCC de procesamiento por el método tradicional y utilizando el enfoque propuesto por Lane	25
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	27
REFERENCIAS.....	30
ANEXOS.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Parámetros económicos de diseño de la mina</i>	24
Tabla 2. <i>Plan de producción con la implementación de la política de LCC tradicional</i>	25
Tabla 3. <i>Plan de producción de la mina con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane.</i>	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Algoritmo de Lane para maximizar el VAN</i>	19
Figura 2. <i>Distribución Ley_Tonelaje del depósito</i>	24

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. <i>LCC del pit final</i>	11
Ecuación 2. <i>LCC de procesamiento</i>	11
Ecuación 3. <i>Costo de Oportunidad</i>	12
Ecuación 4. <i>Utilidad por período</i>	12
Ecuación 5. <i>Valor Actual Neto</i>	15

RESUMEN

Los inversionistas de proyectos mineros cada vez más, desean obtener el mayor rendimiento de las inversiones. La ley de corte crítica (LCC) se ha convertido entonces en el parámetro de decisión que determina la viabilidad económica de un proyecto. La presente investigación tiene como objetivo general Aplicar el algoritmo de Lane para determinar una óptima producción de mineral en una mina de cobre a tajo abierto en el sur del país. La investigación hace uso del algoritmo propuesto por Lane en el año de 1964, como fundamento metodológico. El tipo de investigación es Aplicada y según el nivel de conocimiento que se desea alcanzar es del tipo descriptivo, ya que nuestro proyecto aún no ha sido abordado o no ha sido lo suficientemente estudiado y las condiciones existentes no son aun determinantes; la técnica de recolección de datos fue el análisis documental. Con base a la distribución ley-tonelaje del depósito mineral de cobre se obtiene el plan de explotación de la mina con la LCC obtenida implementando una variación del algoritmo original. Se concluye que aplicando el algoritmo de Lane, se genera un VAN de US\$ 289,888,089 en un tiempo de vida de la mina de 10 años; por otro lado con el método tradicional se genera un VAN de US\$ 252,500,176 con un tiempo de vida de la mina de 27 años; sobrepasando con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane, en treinta y siete millones trescientos ochenta y siete mil novecientos trece dólares (US\$ 37,387,913).

Palabras clave: LCC (Ley de corte critica), VAN (Valor actual neto), algoritmo.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Los inversionistas en minería buscan cada vez obtener una mayor rentabilidad en la explotación de recursos mineros y es allí donde la ley de corte crítica (LCC) se ha convertido en el parámetro de decisión que determina la viabilidad económica de un proyecto.

La ley de corte crítica del yacimiento es por lo tanto el criterio normalmente utilizado en la operación minera, para discriminar entre el mineral factible de extraer obteniendo beneficio económico del depósito. Todo lo que esté por debajo de este valor, es tratado como estéril y lo que esté por encima de este es mineral útil aprovechable. La LCC es la ley donde los ingresos obtenidos por el producto, igualan a los costos de extracción de este, lo que se conoce como punto de equilibrio (Bascetin, Tuylu & Nieto, 2011).

El cálculo de la LCC en las operaciones mineras generalmente se realiza aplicando modelos tradicionales que han sido de gran utilidad en la planificación minera a lo largo de los años, sin embargo, han surgido modelos que determinan esta ley teniendo en cuenta una cantidad de variables que antes no eran consideradas y que han revolucionado el planeamiento que tradicionalmente se venía realizando (Sepúlveda y Avilez, 2014).

Variables como los límites de las capacidades que se dan en las etapas contempladas en la explotación minera, el valor de los costos de oportunidad, la tasa de descuento, consideraciones sociales y ambientales, entre otras, han modificado el modo de obtener la ley de corte crítica. Estas modificaciones surgen básicamente por la

búsqueda del aumento o la maximización del Valor Actual Neto (VAN) de la operación minera ya que, como cualquier industria, la minería tiene como objetivo obtener ingresos tan altos como sea posible, hecho que se materializa con el aumento del VAN (Sepúlveda & Avilez, 2014).

En minería, una política de leyes de corte se hace cada vez más indispensable y determinante para mejorar el negocio. En minería a cielo abierto la estrategia de leyes de corte define el perfil de leyes de corte a utilizar en el programa de producción minero y el destino final del material. La ley de corte es el criterio empleado normalmente en minería para discriminar entre mineral y estéril (Alfaro, 2009).

Lane en el año de 1964, desarrollo un algoritmo que tiene como función objetivo la maximización del VAN a través del cálculo de la LCC. A través de un proceso iterativo donde hay una relación de dependencia entre el VAN y la LCC. Lane logra optimizar ésta última a la vez que maximiza el VAN de la actividad, atendiendo a una cantidad de restricciones que afectan el proceso minero, tales como, las capacidades a las que están sujetas las etapas de minería, procesamiento y beneficio del mineral. Luego en el año 1,988, Lane recopila los avances que ha conseguido en el desarrollo de políticas de optimización de LCC en el programa de computación OGRE (Optimum Grades for Resource Exploitation), con el propósito de brindar una herramienta que facilite el cálculo de la LCC teniendo en consideración variables que afectan el negocio en el transcurso de su explotación. Este programa es diseñado especialmente para el planeamiento a largo plazo, dado que el cálculo de la LCC es un ejercicio complejo si se realiza manualmente (Sepúlveda y Avilez, 2014).

A continuación, se presentan las ecuaciones (1) y (2) que indican la manera tradicional de cálculo de la LCC. La primera se refiere a las LCC del pit final y la segunda a la LCC de procesamiento, llamadas como las leyes de corte crítica de equilibrio.

$$LCC \text{ del del pit final} = \frac{m+c}{(s-r)*y} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$LCC \text{ de procesamiento} = \frac{c}{(s-r)*y} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Dónde:

m = Costo de minado

c = Costo de procesamiento

s = Precio del producto

r = Costo de venta

y = Recuperación

La ecuación (1) garantiza que ningún material se explote de la mina, a menos de que todo el costo directo asociado con obtener y comercializar el mineral sea recuperado.

La ecuación 2 se emplea una vez se hallan seleccionado los bloques destinados para minería con la primera ecuación, el fin es llegar a los bloques de mineral de las leyes más alta, independientemente de los gastos de minería en los cuales se incurran (Sepúlveda & Avilez, 2014).

Las características generales de la LCC definidas en la ecuación 1 y 2 son:

- a. Satisfacer el objetivo de maximizar los beneficios descontados de una operación minera.

- b. Ser constantes a menos que el precio del producto y los costos cambien durante la vida útil de la mina.
- c. No tener en cuenta la distribución del tenor en el depósito.

Lane en su enfoque propone cambiar la política de la definición de la LCC, expresándola como función del VAN con el fin de lograr maximizarlo, en razón a esto se incluye en el cálculo el término costo de oportunidad (F) por tonelada de material procesado por año. Esta consideración surge bajo la concepción de que el no procesar mineral hoy, implica no recibir dinero en el flujo de caja en los primeros años de explotación del proyecto, principio que tiene sus bases en el concepto del valor del dinero en el tiempo (Hustrulid & Kuchta, 2006). El costo de oportunidad “F” es determinado por la ecuación:

$$F = \frac{d*V}{c} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

d = Tasa de descuento

V = VAN

C = Capacidad de procesamiento de la planta.

La ecuación (4) indica la utilidad “P” generada anualmente por la explotación cuando se tiene como restricción o limitante, la capacidad de procesamiento en planta.

$$P = (s - r) * Qr - \left(\frac{f}{c} + c\right) * Qc - m * Qm \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

P = Utilidad por periodo

s = Precio del producto

r = Costos de venta

Q_r = Cantidad de producto obtenido por refinación

f = Costos fijos

C = Capacidad de procesamiento

Q_c = Cantidad de material procesado

m = Costo de minado

Q_m = Cantidad de material minado.

(Chara, 2018), presentó su tesis “Optimización del VAN aplicando la temporalidad del modelo económico para incrementar el beneficio en Compañía Minera Antapaccay S.A.” con el objetivo de optimizar el VAN (Valor Actual Neto por sus siglas en español), para incrementar el beneficio en Compañía Minera Antapaccay S.A. con la cual logró optimizar el NPV aplicando la temporalidad al modelo económico para incrementar el beneficio y rentabilidad de la mina Antapaccay al realizar la evaluación económica de los valores presentes netos.

(Valderrama, 2018) en cuya tesis de maestría “Gestión estratégica de las reservas de una Unidad Minera, utilizando el algoritmo de K. Lane”, buscaba maximizar el valor económico determinando la tasa de Extracción óptima de las reservas para los próximos años de la vida de mina y logró demostrar que el uso de estrategias desde la perspectiva de la economía minera, sobre el ritmo de extracción o leyes de corte, puede optimizar una operación minera.

(Codelco, 2018) define en su página web definen que la ley de corte corresponde a la ley más baja que puede tener un cuerpo mineralizado para ser extraído con beneficio

económico. Todo el material que tiene un contenido por sobre la ley de corte se clasifica como mineral y es enviado a la planta para ser procesado. El resto, que tiene un contenido de más bajo, se considera estéril o lastre y debe ser enviado a botaderos.

La determinación de la ley de corte depende de factores económicos como el precio de los metales, el costo en mina, flete, costos fijos, tasa de interés, etc. y de factores metalúrgico como el tipo de producto, su proceso, capacidad, recuperación, impurezas, subproductos, etc. (Alfaro, 2009).

Existen varios modelos matemáticos que permiten determinar la ley de corte óptima que maximiza el VAN de un proyecto minero. Esta es única y variable en el tiempo, ya que costos asociados son también variables en el tiempo (entre mayores precios más baja es la ley de corte, recuperación). Para la determinación de la estrategia de leyes se utilizará el criterio de Kenneth Lane (Alfaro, 2009).

La estrategia de explotación que maximiza el VAN es aquella que en cada etapa maximiza el flujo de caja de la explotación de ese incremento, menos el costo de oportunidad por desplazar el valor presente del recurso remanente (Alfaro, 2009).

El Valor Actual Neto es un método que toma en cuenta la importancia de los flujos de efectivo en función del tiempo. Consiste en encontrar la diferencia entre el valor actualizado de beneficios futuros, menos el valor actualizado de los costos futuros. La tasa que se utiliza para descontar los flujos es el rendimiento mínimo aceptable de la empresa, por debajo de la cual los proyectos de inversión no deben realizarse (Girón, 2012).

(Pérez, 2017) sobre el Valor Actual Neto, considera que su metodología consiste en descontar al momento actual todos los flujos de caja futuros o en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado. La fórmula que permite calcular el Valor Actual Neto es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 \quad \text{Ecuación (5)}$$

V_t representa los flujos de caja en cada periodo de t .

I_0 es el valor del desembolso inicial de la inversión.

n es el número de periodos considerados.

k es la tasa de descuento

Cuando el VAN toma un valor igual a 0, k pasa a llamarse TIR (Tasa Interna de Retorno). La TIR es la rentabilidad que nos está proporcionando el proyecto. Si el proyecto no tiene riesgo se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico. En otros casos, se utilizará el coste de oportunidad (Pérez, 2017).

La tasa de descuento, es la rentabilidad que pagan los fondos invertidos a una actividad; es también conocida como costo de oportunidad, costo de capital o interés. Es un parámetro necesario para el cálculo del valor presente neto, además refleja los riesgos a los que es sometido el dinero (Valderrama, 2018).

Con la presente investigación se pretende analizar el efecto que produce la aplicación del algoritmo de Kenneth Lane con el fin de maximizar el valor actual neto debido a los flujos de dinero, producto de la producción estratégica de recursos mediante ritmos de producción. Es por tal motivo que aplicando la economía en minera conseguiremos herramientas con las cuales hacer un análisis económico que sumará valor agregado al trabajo realizado apoyando de esa manera al surgimiento y desarrollo de proyectos mineros.

El presente trabajo de investigación se justifica porque la determinación de una óptima producción de mineral, permitirá a las empresas mineras tener una mejor economía a escala, pues le proporciona un elemento estratégico en el negocio que, junto con una ley de corte adecuada, serán los factores a controlar y optimizar con el único propósito de encontrar mejor rentabilidad en el proyecto.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera se logrará una óptima producción de mineral que permita maximizar la rentabilidad en una mina de cobre a tajo abierto en el sur del Perú, 2020?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Aplicar el Algoritmo de Lane para una óptima producción de mineral maximizando la rentabilidad en una mina de cobre a tajo abierto en el sur del Perú, 2020.

1.3.2. Objetivos específicos

Aplicar el Algoritmo de Lane para demostrar la optimización del Valor Actual Neto (VAN).

Maximizar el valor económico determinando una producción óptima de mineral.

Determinar la importancia de la aplicación de algoritmos como criterios optimizantes en la evaluación económica minera.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La aplicación del algoritmo de Lane permitirá una óptima producción de mineral de 30 millones de toneladas anuales en una mina de cobre a tajo abierto en el sur del Perú

1.4.2. Hipótesis específicas

La demostración del Valor Actual Neto (VAN) se determinará aplicando el Algoritmo de Lane.

Con una producción óptima de mineral que puede variar desde 36 millones de toneladas anuales hasta 24 millones de toneladas anuales, se maximiza el valor económico.

Los criterios optimizantes en la evaluación económica minera permite determinar el valor óptimo de producción que se produce, en el punto donde la estrategia de producción paga los costos marginales y los costos de oportunidad.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La investigación fue del tipo Aplicada. Asimismo, el método utilizado fue No experimental con un diseño descriptivo-transversal.

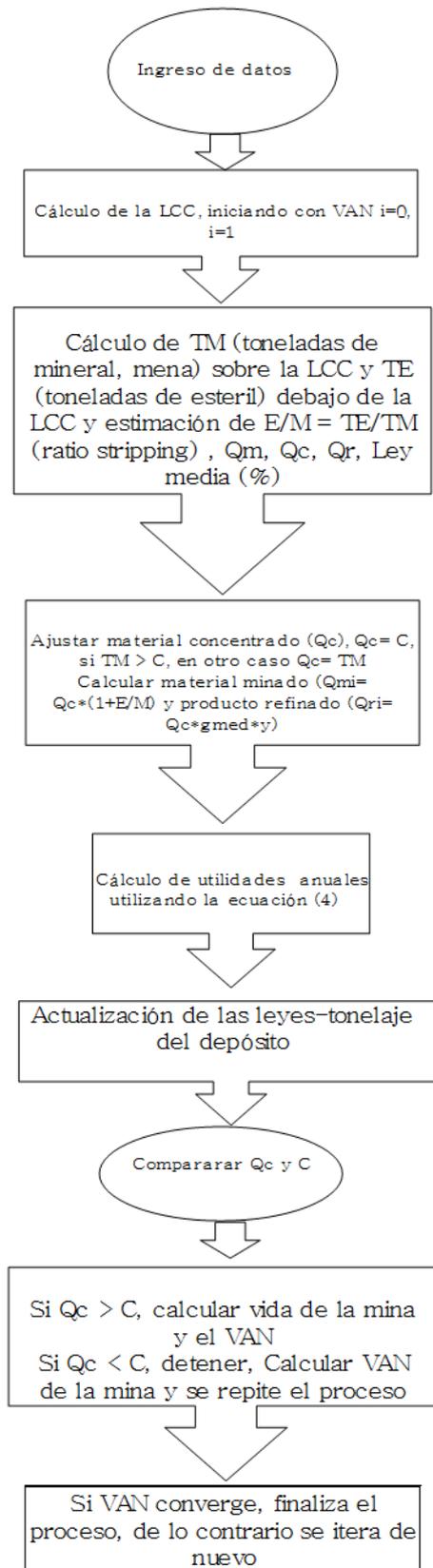
El tipo de investigación es Aplicada pues busca posibles aplicaciones prácticas. Su objetivo consiste en buscar la aplicación de un valor óptimo de producción para aumentar la rentabilidad del proyecto minero.

Vargas (2009), indica que el tipo de investigación Aplicada es una forma de conocer las realidades con una prueba científica; requiere obligatoriamente de un marco teórico, sobre el cual se basará para generar una solución al problema específico que se quiera resolver.

Hernández S., Fernández C. & Baptista L. (1998) concluyen que, los estudios No experimentales descriptivos permiten detallar situaciones y eventos, es decir, como es y cómo se manifiesta determinado fenómeno y busca especificar propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis. En esta investigación se busca describir y determinar algunos factores del dimensionamiento programado que permitan aumentar la producción de los equipos de carguío y acarreo.

La metodología sobre la que se desarrolla la investigación está fundamentada en Algoritmo de Lane, el cual de manera resumida se presenta en la Figura 1.

Figura 1
Algoritmo de Lane para maximizar el VAN



2.2. Población y muestra

Población

Tasas de descuento (COK) de 15%, 17 % y 20 % anual, producción por año y VAN para cada COK utilizado en los algoritmos.

Muestra

COK al 20 % anual, producción por año y VAN para cada COK, utilizado en el algoritmo de Lane.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

La técnica de recolección de datos fue el análisis documental. El análisis documental, consiste en la revisión de antecedentes relacionados al tema de nuestra investigación en Revistas especializadas, tesis realizadas, utilizando el internet. Con esta técnica se consiguieron los datos necesarios para la aplicación del Valor Actual Neto (VAN) y el Algoritmo de Lane. La Aplicación del Algoritmo Lane nos sirve para la determinación de un beneficio económico agregado por extraer una fracción de las reservas. Se hace uso de las ecuaciones 1 y 2 para determinar la política de LCC tradicional, y del Algoritmo de Lane para hallar el plan de producción de la Mina usando la política de optimización de LCC.

Luego los datos son procesados con la aplicación de cálculos matemáticos.

Instrumento de recolección de datos

Los instrumentos se utilizaron para obtener los datos de las toneladas de mineral y la distribución de la ley de cobre, parámetros de diseño de la mina y el plan de producción. Se muestran en los siguientes instrumentos.

Instrumento 01: Ficha de parámetros económicos de diseño de la mina. Ver Anexo 03.

Instrumento 02: Ficha del plan de producción de la mina con la implementación de la política de LCC tradicional. Ver Anexo 04.

Instrumento 03: Ficha del plan de producción de la mina con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane. Ver Anexo 05.

2.4. Procedimiento

Se realizó una comparación con los datos actuales y los programados según el cálculo realizado, de esta manera se evaluó la rentabilidad en la mina.

2.4.1. Gabinete

Primer Paso: Radicó en la búsqueda de información relevante relacionado al tema, para llevar a cabo este objetivo se utilizó el internet para ingresar a los repositorios virtuales de las universidades, tanto nacionales como extranjeras.

Segundo Paso: se determinó el problema, objetivo general y la finalidad de la tesis, se establecieron las hipótesis y se desarrolló el marco teórico.

Tercer Paso: se demostró y contrastó la hipótesis planteada con los resultados obtenidos del análisis de los títulos y de la bibliografía recaudada. Se determinaron las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

2.4.2. Campo

Se realiza la toma de datos en campo, especialmente los correspondientes al proceso de producción, de la misma forma se toma en cuenta los datos de los equipos que participan en este proceso.

Existen varios modelos matemáticos que permiten determinar la ley de corte óptima que maximiza el VAN de un proyecto minero. Esta es única y variable en el tiempo, ya que costos asociados son también variables en el tiempo (entre mayores precios más baja es la ley de corte, recuperación). Para la

determinación de la estrategia de leyes se utilizará el criterio de Kenneth Lane (Alfaro Cortez, 2009).

Aplicando el modelo de LANE:

- Sea “V” = Valor presente de una operación basado en un recurso finito.
- Los flujos de caja “ C_i ” dependen d precios y costos en el tiempo, por lo que el valor de V depende del tiempo presente “T”.

$$V = V(T)$$

- El valor presente depende también de la cantidad de recurso remanente “R”

$$V = V(T, R)$$

V depende también de la estrategia de operación empleada a futuro “O”.

$$V = V(T, R, O)$$

- En caso de una estrategia de leyes de corte, “O” consiste en una ley de corte variable, que puede tomar valores “ g_1, g_2, \dots, g_n ” para lo que resta de la vida de la mina.

$$O = g_1, g_2, \dots, g_n$$

$$V = V(T, R, g_1, g_2, \dots, g_n)$$

- De todos los conjuntos de estrategias de operación “O” que se pueden adoptar, hay un conjunto que es óptimo que dará el Max V.

La estrategia de explotación que maximiza el VAN es aquella que en cada etapa maximiza el flujo de caja de la explotación de ese incremento, menos el costo de oportunidad por desplazar el valor presente del recurso remanente (Alfaro, 2009).

2.4.3. Gabinete

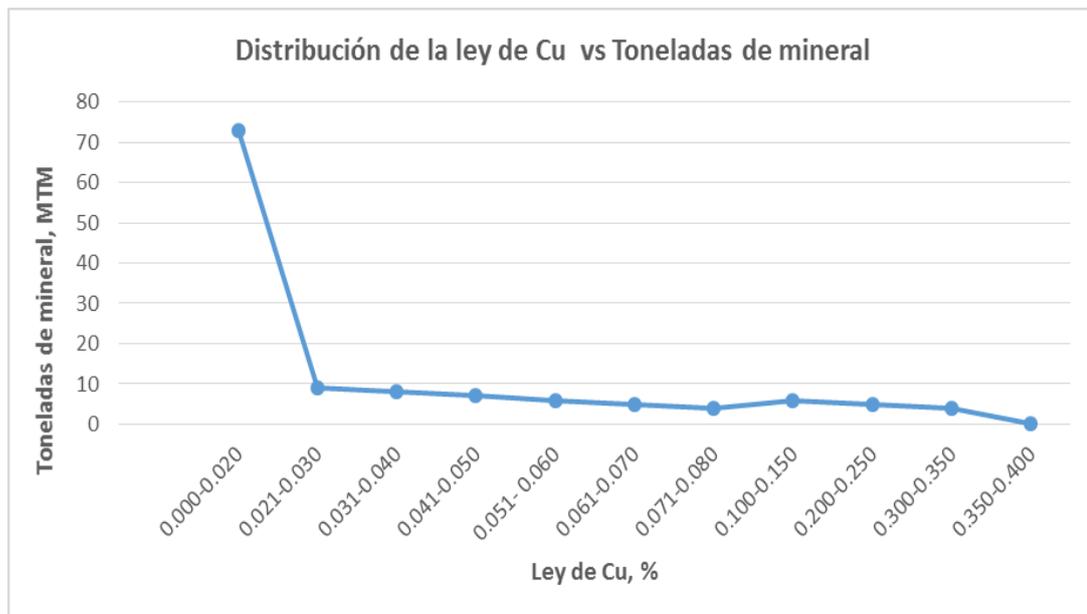
En esta última etapa se procedió a seleccionar y organizar la información recopilada sobre ritmos de producción con la finalidad de establecer el óptimo para la unidad minera. Como un proceso para el análisis de datos comprende tabulaciones, representaciones gráficas y descripción de los datos empíricos; a fin de comprender y realizar interpretaciones de los datos obtenidos en cara a la verificación de la hipótesis. Del procedimiento de análisis de datos, se procederá a resumir los resultados en tablas, gráficas, figuras y descripción de los diferentes datos empíricos, empleando el software Excel como herramienta de ayuda.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Distribución Ley – Tonelaje y parámetros de diseño de la mina

Figura 2

Distribución Ley _Tonelaje del depósito



Fuente: Datos de exploración de la mina en estudio.

Tabla 1

Parámetros económicos de diseño de la mina

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
m	Costo mina	US\$/TM	3.90
c	Costo Planta	US\$/TM	37.00
r	Costo de venta	cUS/lb	4.50
fa	Costos fijos	US\$/año	9'350,000
s	Precio de venta	cUS/lb	900
y	Recuperación metalúrgica	%	88
C	Capacidad de procesamiento	MTM/año	1'080,000
d	Tasa de descuento (COK)	%	15
f	Costo unitario fijo	US\$/TM	8.70

Fuente: Datos del proyecto de la mina en estudio

La Tabla 1 asume capacidades y acepta costos para la explotación del yacimiento con una tasa de procesamiento de mineral de 3086 TM/día.

3.2. Programa de producción obtenido al calcular la LCC de procesamiento por el método tradicional y utilizando el enfoque propuesto por Lane

Tabla 2.

Plan de producción de la mina con la implementación de la política de LCC tradicional.

Año	LCC óptima (%)	Material concentrado (Mt)	Producto Refinado (Kt)	Utilidad (MUS \$)	Ley Media (%)
1	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
2	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
3	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
4	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
5	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
6	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
7	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
8	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
9	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
10	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
20-27	0.047	1.1	109.4	38.7	0.115
TOTAL		29.2	2,953	1,047	0.115
				VAN	252'5

Fuente: Datos del proyecto de la mina en estudio

La Tabla 2 muestra el programa de producción obtenido al calcular la LCC de procesamiento por el método tradicional, arrojando una LCC de 0.047 % de Cu con una capacidad de material minado de 4.9 millones de toneladas por año, obteniendo un VAN de doscientos cincuenta y dos millones quinientos mil ciento setenta y seis dólares (US\$ 252,500,176) con un tiempo de vida de la mina de 27 años.

Tabla 3

Plan de producción de la mina con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane.

Año	Material minado (Mt)	Producto Refinado (Kt)	Utilidad (MUS \$)	VAN (MUS \$)	Ley Media (%)
1	14.1	197.6	72.5	289.9	0.208
2	14.1	195.7	70.8	226.9	0.206
3	14.1	193.2	68.6	173.4	0.203
4	14.1	190.0	65.7	128.3	0.200
5	14.1	185.6	61.8	90.8	0.195
6	14.1	179.2	56.0	60.0	0.189
7	14.1	169.0	46.9	35.9	0.178
8	14.1	150.4	30.2	18.2	0.158
9	12.7	134.0	21.0	116.6	0.141
10	7.3	78.4	9.2	63.1	0.125
TOTAL	133.3	1,673	502.7	1,203.1 VAN	0.115 289'9

Fuente: Datos del proyecto de la mina en estudio

La Tabla 3 proporciona el planeamiento de la mina como resultado de la implementación del enfoque propuesto por Lane en su algoritmo. La LCC óptima para la vida de la mina es de 0.101 % de Cu. Un VAN de doscientos ochenta y nueve millones ochocientos ochenta y ocho mil ochenta y nueve dólares (US\$ 289,888,089) es arrojado en un tiempo de vida de la mina de 10 años, sobrepasando en treinta y siete millones trescientos ochenta y siete mil novecientos trece dólares (US\$ 37,387,913) el valor alcanzado con la LCC tradicional.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

A partir de los hallazgos encontrados, con la información doctrinada expuesta y la información estadística presentada, se determina la aplicación del algoritmo de Lane para una óptima producción de mineral, evidenciándose información clara y concisa.

En la Tabla 1 y Figura 2 se muestran la información de los parámetros económicos de diseño de la mina y la distribución ley de Cu % vs toneladas de mineral, que corresponden a los datos de entrada del algoritmo. Asimismo, en la tabla 2, se analiza una estrategia de planificación de LCC tradicional, donde se asume un mínimo riesgo por parte del inversionista asociado con la rentabilidad que espera obtener del negocio. Este hecho obedece a la estructura misma de la ecuación de LCC de procesamiento, donde no se considera ningún parámetro que relacione el riesgo y el valor del dinero en el tiempo, como resultado de esta condición se obtienen utilidades constantes en la vida del proyecto. Los resultados de la investigación contrastan con lo afirmado por (Alfaro,2009) quién concluye que la determinación de la ley de corte depende de factores económicos como el precio de los metales, el costo en mina, flete, costos fijos, tasa de interés, etc. y de factores metalúrgico como el tipo de producto, su proceso, capacidad, recuperación, impurezas, subproductos, etc.

Los datos obtenidos en la Tabla 3, se analiza una estrategia de planificación con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane, donde se tienen en consideración el costo de oportunidad del inversionista y el valor del dinero en el tiempo, asumiendo un riesgo relacionado con la actividad al esperar obtener una rentabilidad mínima de la inversión

realizada. En razón a esto se observan utilidades anuales distintas en el transcurso del proyecto.

En la tabla 2 y tabla 3 se puede observar que las utilidades anuales en cada uno de los planes de producción obtenidos son diferentes, siendo menor la suma del total de las alcanzadas con el enfoque de optimización de la LCC. Los resultados confirman lo investigado por (Valderrama, 2018) quién logró demostrar que el uso de estrategias desde la perspectiva de la economía minera, sobre el ritmo de extracción o leyes de corte, puede optimizar una operación minera.

4.2 Conclusiones

Según la hipótesis general, la aplicación del algoritmo de Lane permitirá una óptima producción de mineral de 30 millones de toneladas anuales en una mina de cobre a tajo abierto en el sur del Perú.

Se concluye que, aplicando el algoritmo de Lane, se genera un VAN de doscientos ochenta y nueve millones ochocientos ochenta y ocho mil ochenta y nueve dólares (US\$ 289,888,089), en un tiempo de vida de la mina de 10 años; por otro lado con el método tradicional se genera un VAN de doscientos cincuenta y dos millones quinientos mil ciento setenta y seis dólares (US\$ 252,500,176) con un tiempo de vida de la mina de 27 años; sobrepasando con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane, en treinta y siete millones trescientos ochenta y siete mil novecientos trece dólares (US\$ 37,387,913).

Se concluye que la maximización del VAN de una operación minera es dependiente de la optimización de la LCC, y de la política o estrategia con la que se calcule esta ley. Por el método tradicional, con una LCC de 0.047 % de Cu, y una capacidad de material minado de 4.9 millones de toneladas por año, se obtuvo un VAN de US\$ 252,500,176 con un tiempo de vida de la mina de 27 años. Aplicando el Algoritmo de Lane, con una LCC de 0.101 % de Cu, y una capacidad de material minado de 14.1 millones de toneladas del primer al octavo año, el año 9 y 10 con una capacidad de minado de 12.7 y 7.3 millones de toneladas respectivamente, se obtuvo un VAN de US\$ 252,500,176 con un tiempo de vida de la mina de 10 años.

Se logró determinar una tasa de descuento óptima (COK) de extracción global de las reservas, para los próximos años y también las tasas de extracción puntuales desde el comienzo de la extracción del yacimiento al aplicar el algoritmo de K. Lane; el cual resulta ser una herramienta bastante útil al momento de la fase de planeamiento de mina. Se concluye que esta aplicación de la economía minera nos puede ofrecer pautas para desarrollar la estrategia por la cual una reserva mineral debería ser extraída, para maximizar el VAN correspondiente a cada periodo y así lograr el mismo efecto en el valor final de todo el proyecto. Esta herramienta de optimización es general y puede ser usada en cualquier actividad en la que el producto que genera rentabilidad tiene una vida finita.

REFERENCIAS

- Alfaro Cortés, M. A. (2009). *Efecto de la aplicación de leyes de corte en el cálculo de un programa de producción*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Bascetin A., Tuylu, S. & Nieto, A. (2011). *Influence of the ore block model estimation on the determination of the mining cutoff grade policy for sustainable mine production*. Environ Earth Sci, 64, pp.1409-1418.
- Bogotá Emprende (2010). *Define y Proyecta el Flujo de Caja de tu Empresa*. Obtenido de Bogotá Emprende Soluciones Efectivas para crear y consolidar tu empresa:
https://bibliotecadigital.ccb.org.co/bitstream/handle/11520/1466/3615_15_02_10_2doc_flujocaja.pdf?sequence=1
- Codelco (2018). *Glosario de conceptos mineros*. Codelco-Chile.
<https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/glosario.html?letra=l>
- Chara Hanco, M. S. (2018). *Optimización del NPV aplicando la temporalidad del modelo económico para incrementar el beneficio en la compañía minera Antapaccay s.a.* Arequipa: Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.
- Girón Milián, E. H. (2012). *La tasa interna de retorno y el valor actual neto como herramientas de evaluación financiera, en proyectos para plantaciones de madera teca*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hernández Cortez, N. (2010). *Fundamentos de Macroeconomía*. Obtenido de Nohernandezcortez's Blog:
<https://nohernandezcortez.files.wordpress.com/2010/10/2-3-analisis-economico-de-los-costos1.pdf>
- Hustrulid, W. & Kuchta, M. (2006). *Open pit mine planning & design*. Second edition. pp. 526-555. Londres: Taylor & Francis Group.

Hernandez Sampieri R., Fernandez Collado C., Baptista Lucio P. (1998). *Metodología de la Investigación*. Cuarta Edición, Editorial Mc. Graw Hill.

Lane, K.F. 1964. Choosing the optimum cut-off grade. Colorado School

Pérez Aguilera F. (2017). *Marketing y Plan de negocio de la microempresa*. Editorial CEP, Madrid-España.

Sepúlveda G. & Avilez D. (2014). *Planeamiento Minero como función de la variación de la ley de corte critica*. Universidad Nacional de Colombia.

Valderrama Gutiérrez, D. D. (2018). *Gestión Estratégica de las reservas de una unidad minera, utilizando el algoritmo de K. Lane*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

Vargas Cordero Zoila Rosa (2009). *La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica*. Universidad de Costa Rica. Costa Rica.

<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-tecnologica-del-peru/comprencion-y-redaccion-de-textos-i/vargas-la-investigacion-aplicada-2009/15112485>

ANEXOS

Anexo 1. Precio del cobre refinado en las bolsas de metales LME y COMEX desde el año 1990 hasta el año 2019

PRECIO DEL COBRE REFINADO

(Centavos de dólar por libra)

AÑO	B.M.L. / LME	COMEX
1990	120.879	119.085
1991	106.066	104.875
1992	103.573	102.721
1993	86.713	85.283
1994	104.903	107.052
1995	133.198	134.717
1996	103.894	105.872
1997	103.224	103.579
1998	74.974	75.077
1999	71.380	72.111
2000	82.294	83.971
2001	71.566	72.567
2002	70.647	71.672
2003	80.734	81.050
2004	130.106	128.972
2005	167.087	168.227
2006	305.295	308.935
2007	323.246	322.172
2008	315.316	313.358
2009	234.217	235.417
2010	341.978	342.511
2011	399.656	400.500
2012	360.593	361.450
2013	332.120	334.114
2014	311.255	311.996
2015	249.226	250.814
2016	220.563	219.727
2017	279.684	280.425
2018	295.880	292.568
2019	272.143	272.267
PROMEDIO	195.080	195.436
DESVIACION ESTANDAR	109.549	109.579
COEFICIENTE VARIACION %	56.156	56.069

Anexo 2. Precio del cobre refinado en las bolsas de metales LME y COMEX en el año 2020

PRECIO DEL COBRE REFINADO			
DIA/MES/AÑO	B.M.L. / LME (USD cents/lb.)	DIA/MES/AÑO	B.M.L. / LME (USD cents/lb.)
02/01/2020	279.66	26/03/2020	216.61
03/01/2020	275.65	27/03/2020	216.55
06/01/2020	276.58	30/03/2020	216.05
07/01/2020	278.26	31/03/2020	217.59
08/01/2020	279.14	01/04/2020	216.45
09/01/2020	279.23	02/04/2020	218.7
10/01/2020	279.28	03/04/2020	220.6
13/01/2020	280.18	06/04/2020	220.76
14/01/2020	283.36	07/04/2020	229.86
15/01/2020	282.68	08/04/2020	225.71
16/01/2020	285.79	09/04/2020	225.14
17/01/2020	284.7	14/04/2020	232.19
20/01/2020	283.27	15/04/2020	229.27
21/01/2020	279.34	16/04/2020	231.26
22/01/2020	276.85	17/04/2020	234.76
23/01/2020	274.42	20/04/2020	234.48
24/01/2020	270.7	21/04/2020	226.55
27/01/2020	262.13	22/04/2020	228.34
28/01/2020	259.23	23/04/2020	232.26
29/01/2020	258.46	24/04/2020	232.15
30/01/2020	254.96	27/04/2020	234.3
31/01/2020	252.65	28/04/2020	234.48
03/02/2020	253.79	29/04/2020	235.14
04/02/2020	256.37	30/04/2020	237.27
05/02/2020	259.18	01/05/2020	229.56
06/02/2020	259.73	04/05/2020	229.43
07/02/2020	256.42	05/05/2020	231.85
10/02/2020	256.71	06/05/2020	235.85
11/02/2020	258.37	07/05/2020	237.12
12/02/2020	260.68	11/05/2020	237.27
13/02/2020	259.27	12/05/2020	237.41
14/02/2020	260.23	13/05/2020	236.44
17/02/2020	263.17	14/05/2020	233.85
18/02/2020	259.82	15/05/2020	234.28
19/02/2020	260.61	18/05/2020	238.11
20/02/2020	259.91	19/05/2020	241.04
21/02/2020	258.64	20/05/2020	241.9
24/02/2020	256.62	21/05/2020	244.35
25/02/2020	256.89	22/05/2020	237.8
26/02/2020	254.65	26/05/2020	242.29
27/02/2020	254.83	27/05/2020	240.79
28/02/2020	252.79	28/05/2020	239.43
02/03/2020	255.83	29/05/2020	241.88
03/03/2020	257.1	01/06/2020	243.87
04/03/2020	258.3	02/06/2020	247.8
05/03/2020	257.07	03/06/2020	249.43
06/03/2020	255.1	04/06/2020	247.32
09/03/2020	248.7	05/06/2020	253.47
10/03/2020	253.92	08/06/2020	256.69
11/03/2020	251.83	09/06/2020	257.66
12/03/2020	244.33	10/06/2020	263.13
13/03/2020	250.86	11/06/2020	263.15
16/03/2020	236.37	12/06/2020	262.43
17/03/2020	236.09	15/06/2020	256.1
18/03/2020	220.47	16/06/2020	261.25
19/03/2020	212.51	17/06/2020	260.09
20/03/2020	220.22	18/06/2020	263.04
23/03/2020	209.45	19/06/2020	264.69
24/03/2020	217.25	22/06/2020	264.22
25/03/2020	215.64		
		PROMEDIO	248.195
		DESVIACION ESTANDAR	10.073
		COEFICIENTE VARIACION %	4.058

Anexo 3. Instrumento 01: Ficha de parámetros económicos de diseño de la mina.

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
m	Costo mina	US\$/TM	
c	Costo Planta	US\$/TM	
r	Costo de venta	cUS/lb	
fa	Costos fijos	US\$/año	
s	Precio de venta	cUS/lb	
y	Recuperación metalúrgica	%	
C	Capacidad de procesamiento	MTM/año	
d	Tasa de descuento (COK)	%	
f	Costo unitario fijo	US\$/TM	

Anexo 4. Instrumento 02: Ficha del plan de producción de la mina con la implementación de la política de LCC tradicional.

Año	LCC óptima (%)	Material concentrado (Mt)	Producto Refinado (Kt)	Utilidad (MUS \$)	Ley Media (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
20-27					
TOTAL					
				VAN	

Anexo 5. Instrumento 03: Ficha del plan de producción de la mina con la LCC utilizando el enfoque propuesto por Lane.

Año	Material minado (Mt)	Producto Refinado (Kt)	Utilidad (MUS \$)	VAN (MUS \$)	Ley Media (%)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
TOTAL				VAN	