

# PLANEAMIENTO MINERO COMO FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LEY DE CORTE CRÍTICA

## MINE PLANNING AS A FUNCTION OF VARIATION CUTOFF GRADE

GIOVANNI FRANCO-SEPÚLVEDA

*Doctor (c), Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. gfranco@unal.edu.co*

DANILO ARTURO VELILLA-AVILEZ

*Ingeniero de Minas y Metalurgia. GIPLAMIN. Universidad Nacional de Colombia, davelillaa@unal.edu.co*

Recibido para revisar: 15-Noviembre-2012, Aceptado: 20-12-2013, versión final: 06-Marzo-2014.

**RESUMEN:** Los accionistas de proyectos mineros buscan cada vez obtener el mayor rendimiento de las inversiones que realizan en la industria de la explotación de recursos no renovables. La ley de corte crítica (LCC) se ha convertido entonces en el parámetro de decisión que determina la viabilidad económica de un proyecto. En el presente artículo se determina la LCC óptima de un depósito mineral hipotético con la que se pretende maximizar el valor presente neto (VPN) de la operación, determinando como influye el cambio de ésta en el planeamiento de la mina. El trabajo se desarrolla haciendo uso del algoritmo propuesto por Lane (1964) como fundamento metodológico. Además, se hace una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el tema, que sirvieron como guía para la elaboración de este documento. Con base a la distribución tenor-tonelaje de un depósito mineral hipotético se obtiene el plan de explotación de la mina con la LCC obtenida implementando una variación del algoritmo original. Por último, se exponen las conclusiones referentes al plan de producción y el VPN de la mina, obtenidas al comparar los resultados arrojados con este enfoque y los obtenidos usando el método tradicional para el cálculo de la LCC.

**Palabras clave:** Ley de corte crítica; VPN; optimización; planeamiento minero.

**ABSTRACT:** Shareholders of mining projects increasingly seek to obtain the best return on investments by industry exploitation of nonrenewable. The cutoff grade (COG) has become so in the decision parameter that determines the economic viability of a project. In this article we examine the (COG) of a hypothetical mineral deposit optimum which aims to maximize the net present value (NPV) of the operation, determining how it affects change in mine planning. The work is developed using the algorithm proposed by Lane (1964) as a methodological foundation. Moreover, it is a literature review of work on the topic, which served as a guide for the preparation of this document. Based on the tenor-tonnage distribution of a mineral deposit is obtained hypothetical operating plan of the mine with the COG obtained implementing a variation of the original algorithm. Finally, conclusions are presented concerning the production plan and the NPV of the mine, obtained by comparing the results obtained with this approach and those obtained using the traditional method for calculating COG.

**Keywords:** Cut-Off grade; NPV; optimization; mine planning.

### 1. INTRODUCCIÓN

La ley de corte crítica de un yacimiento es el criterio normalmente utilizado en la operación minera para discriminar entre el mineral factible de extraer obteniendo beneficio económico del depósito y el estéril (Bascetin et al., 2011). Todo lo que esté por debajo de este valor es tratado como estéril, y lo que esté por encima de este como 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.

El cálculo de la LCC en las operaciones mineras generalmente se hace a través del uso de modelos tradicionales que han sido de gran utilidad en la planificación minera a lo largo del tiempo, 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 ha venido realizando.

Variables como los límites de las capacidades que se dan en las etapas contempladas en la industria minera, el valor del costo de oportunidad, la tasa de descuento, consideraciones ambientales y sociales, entre otras, han modificado la manera de obtener la ley de corte crítica. Estas modificaciones surgen esencialmente como la búsqueda del aumento o maximización del VPN de la operación minera, ya que como cualquier industria, la minería tiene como propósito obtener ingresos tan altos como sea posible, hecho que se ve traducido en el aumento del VPN.

La política bajo la cual se maneja la LCC está ligada a distintos factores que condicionan la elección de LCC adecuada según el interesado, es decir, según las partes que afecte el negocio. Actores internos y externos tienen distintos intereses sobre la LCC y las reservas que se

deriven a partir de ella. Entre los actores externos se encuentran las agencias gubernamentales, comunidades locales, instituciones financieras, ambientalistas, agencias no gubernamentales, proveedores, contratistas, entre otros. Mientras que los actores internos incluyen tanto la empresa como los empleados. En razón a este conflicto de interés es difícil establecer la LCC adecuada, por tal razón todos estos actores deben ser comprendidos para su estimación. Sin embargo, las leyes deben ser calculadas teniendo en cuenta las restricciones económicas y técnicas (Rendu, 2008).

Con este artículo se pretende analizar el efecto que tiene sobre un proyecto minero la aplicación de políticas o estrategias de LCC que busquen su optimización. El desarrollo de este trabajo tiene como propósito optimizar la LCC de la explotación de un proyecto minero con el objetivo de maximizar el VPN de la operación. Adicionalmente, se analizar las implicaciones del programa de planeamiento de la mina con la política de LCC utilizada.

## 2. METODOLOGÍA

La maximización del VPN en la operación minera influye de forma directa sobre los planes de producción de una mina debido a su dependencia con la LCC, de esta manera maximizar el valor del negocio minero conlleva al cambio del tiempo de vida de la mina en el planeamiento a largo plazo.

La optimización de la LCC en la operación minera es el punto a partir del cual se logra maximizar el VPN, en razón a esto el desarrollo de este trabajo se focaliza en estudiar y desarrollar el procedimiento que permite optimizarla.

Importantes avances se han dado en la manera de calcular la LCC, los cuales han venido evolucionado de manera horizontal con el cambio que progresivamente ha experimentado la concepción del negocio a través del tiempo.

Lane (1964), desarrollo un algoritmo que tiene como función objetivo la maximización del VPN a través del cálculo de la LCC. A través de un proceso iterativo donde hay una relación de dependencia entre el VPN y la LCC. Lane logra optimizar ésta última a la vez que maximiza el VPN 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.

Lane (1988), 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.

Rendu (2008), plasma los avances en materia de estimación de la LCC en los últimos 30 años, los principios y conceptos sobre los que se ha desarrollado, estructurando un análisis de las implicaciones que tiene sobre la operación minera su optimización con el fin de aumentar el VPN sustentado en el costo de oportunidad y otros costos asociados.

Publicaciones elaboradas por distintos autores encaminadas a maximizar el VPN de un proyecto minero han fundamentado su trabajo en los principios antes expuestos, entre estos están Bascetin & Nieto (2006), Dagdelen (1992), Bascetin & Nieto (2007), Rendu (2009), Liz & Nieto (2012), Nieto & Zhang (2013) por realizar aportes que han contribuido al cambio en la formulación de política de la LCC.

### 2.1. LCC del pit final y LCC de Lane

La ley de corte crítica es el parámetro económico en la planificación minera cuya finalidad es separar, es decir, a partir de esta se determina qué bloque de material se debe extraer del depósito y cuál no, y/o establecer que proporción de mineral minado es destinado para el procesamiento y cual para los botaderos.

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.

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

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

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 (Dagdelen, 1992).

Las características generales de la LCC definidas en la ecuación 1 y 2 son (Dagdelen, 1992):

- I. Satisfacer el objetivo de maximizar los beneficios descontados de una operación minera.
- II. Ser constantes a menos que el precio del producto y

los costos cambien durante la vida útil de la mina.

III. 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 VPN 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, 2006).

El costo de oportunidad es determinado por la ecuación (3):

$$F = \frac{d * V}{C} \quad (3)$$

Dónde:

d = tasa de descuento

V = VPN

C = Capacidad de procesamiento de la planta.

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

$$P = (s - r)Qr - \left(\frac{f}{C} + c\right)Qc - mQm \quad (4)$$

Dónde:

P = Utilidad por periodo

s = Precio del producto

r = Costos de venta

Qr = Cantidad de producto obtenido por refinación

f = Costos fijos

C = Capacidad de procesamiento

Qc = Cantidad de material procesado

m = Costo de minado

Qm = Cantidad de material minado.

La LCC de la mina sujeta a la restricción mencionada anteriormente queda expresada por la ecuación (5) como sigue:

$$g_c = \frac{c + \frac{f + d * V}{C}}{(P - r)y} \quad (5)$$

Dónde:

gc = Ley de corte crítica de procesamiento.

La metodología sobre la que se desarrolla este artículo está fundamentada en Algoritmo de Lane, el cual de manera

resumida se presenta en la Figura 1.

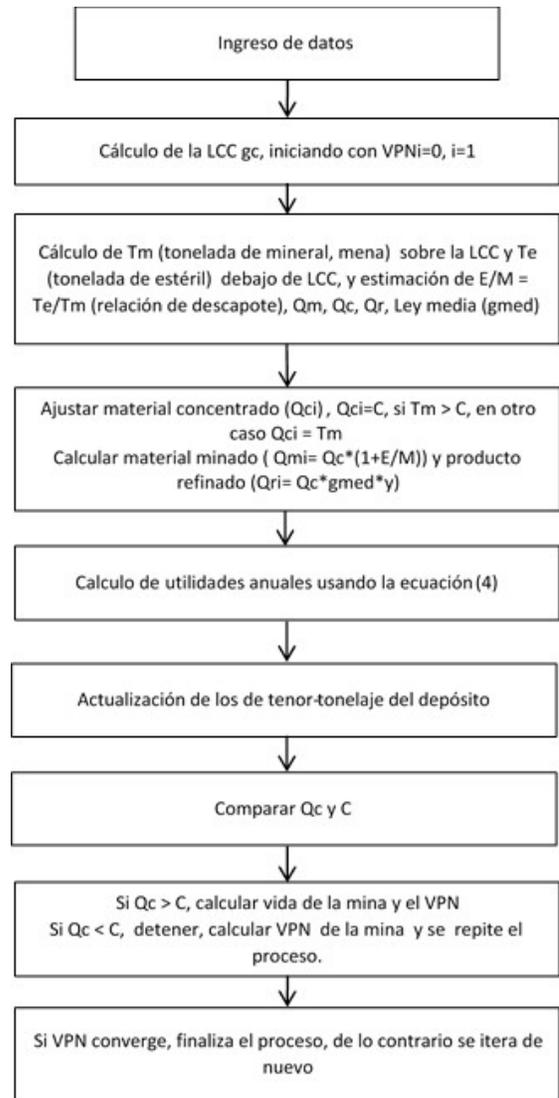


Figura 1. Algoritmo de Lane para maximizar el VPN. Fuente: Modificado de Lane (1964) y Bascetin & Nieto (2007).

### 3. CASO DE ESTUDIO

Este trabajo se desarrolla con base a la distribución tenor-tonelaje de un depósito de oro de una mina que es explotada a cielo abierto, modificado de Dagdelen, (1992). El fundamento metodológico explicado en la sección anterior se aplica a la mina objeto de caso de estudio. 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.

La Figura 2 y la Tabla 1 muestran respectivamente, la información de la distribución tenor-tonelaje y los parámetros de diseño de la mina que corresponden a los datos de entrada del algoritmo.

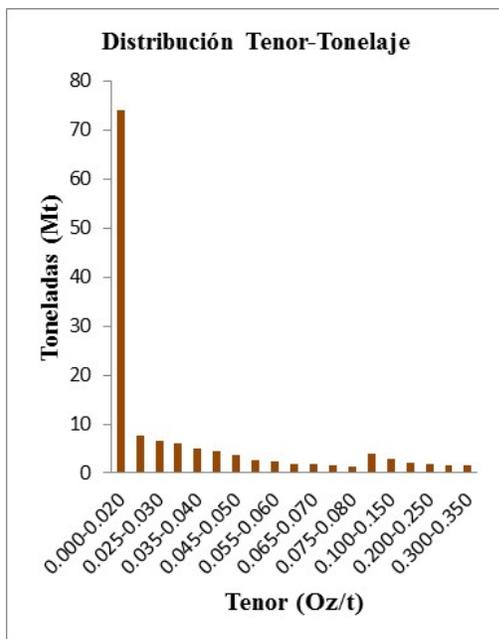


Figura 2. Distribución Tenor-tonelaje del depósito.

Tabla 1. Parámetros económicos de diseño de la mina.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
m	Costo de minado	3.9	US\$/t
c	Costo de procesamiento	37	US\$/t
r	Costos de venta	4.5	US\$/Oz
fa	Costos fijos	9350000	US\$/año
s	Precio	900	US\$/Oz
y	Recuperación	88	%
C	Capacidad de procesamiento	1080000	Mt/año
d	Tasa de descuento	15	%
f	Costo fijo	8.7	US\$/t

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

#### 4. RESULTADOS

A continuación se muestran en las Tablas 2 y 3 los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología en el caso de 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 oz/ton con una capacidad de material minado de 4.9 millones de toneladas por año, obteniendo un VPN 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 2. Plan de producción de la mina con la implementación de la política de LCC tradicional.

Año	LCC óptima (Oz/t)	Material concentrado (Mt)	Producto refinado (kt)	Utilidad (MUS\$)	Ley media (Oz/t)
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	
			VPN	252,5	

En la Tabla 2 se refleja una estrategia de planificación donde se asume un mínimo riesgo por parte del inversionista asociado con la rentabilidad que espera obtener del negocio. Hecho que 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 consecuencia de esta condición se obtienen utilidades constantes en la vida del proyecto.

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 (Oz/t). Un VPN 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.

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\$)	VPN (MUS\$)	Ley media (Oz/t)
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	502,4	289,9	

Los datos obtenidos en la Tabla 3 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.

Las utilidades anuales en cada uno de los planes de producción obtenidos son diferentes como se muestra en la Figura 3, siendo menor la suma del total de las alcanzadas con el enfoque de optimización de la LCC. El objetivo de este trabajo no es maximizar las utilidades, de hecho, según los fundamentos de la administración financiera, el objetivo básico financiero de una empresa no es maximizar las utilidades sino generar valor (VP de los futuro flujos de caja) (León, 2009).

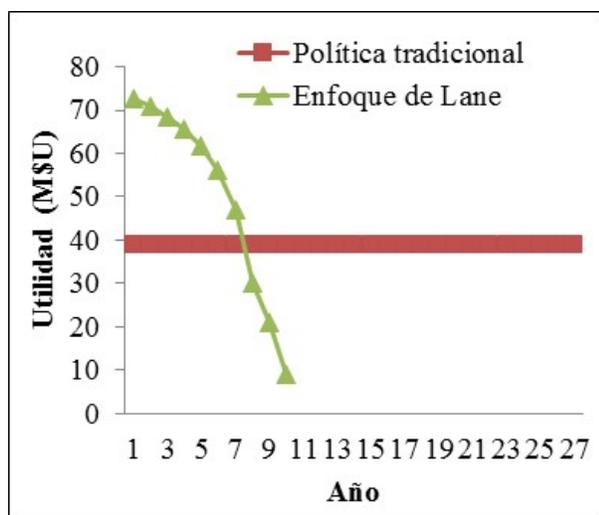


Figura 3. Utilidad por año dependiendo de la estrategia de LCC utilizada.

## 5. CONCLUSIONES

Se enumeran a continuación algunas conclusiones:

- A. La maximización del VPN 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. De esta manera para la estimación de la LCC, un algoritmo alterno puede considerar otros costos que no se tienen en cuenta comúnmente en el cálculo, tales como los costos sociales y ambientales, que afectan el valor del VPN.
- B. Se comprobó que es posible aumentar el valor al negocio según el modelo utilizado, optimizando la LCC con el fin de generar mayor flujo de dinero en valor presente. En el caso de estudio hubo un incremento de US\$ 37,387,913. en el VPN como resultado de la optimización de la ley de corte, lo que corresponde a un incremento del 14.8% respecto al valor arrojado por el método tradicional.
- C. Las políticas bajo las cuales se establece la LCC de una mina están condicionadas a los distintos intereses y las distintas formas de percepción que se tienen del negocio.

En este conflicto de intereses surge el dilema de escoger la LCC adecuada que de alguna manera supla las necesidades de todas las partes.

- D. En éste trabajo se proporciona una herramienta que hace posible maximizar el VPN a partir de la optimización de la LCC a través de la actualización de la distribución de reservas periodo a periodo, estando sujeto a restricciones técnicas y económicas, en este caso la capacidad de procesamiento de la planta y los parámetros de diseño. De esta manera, se concluye que el algoritmo es muy versátil y está diseñado para poder trabajar con una gran cantidad de variables que sean de importancia en la industria minera y que de alguna manera afecten las utilidades generadas por el negocio.

## REFERENCIAS

- [1] Bascetin, A. & Nieto, A. 2007. Determination of optimal cutoff grade policy to optimize NPV using a new approach with optimization factor. The southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107, pp. 87-95.
- [2] 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.
- [3] Dagdelen, K. 1992. Cutoff grade optimization. Homestake Mining Company, 7, pp. 32-40.
- [4] Hustrulid, W. & Kuchta, M. 2006. Open pit mine planning & design. Second edition. pp. 526-555. Londres: Taylor & Francis Group.
- [5] Lane, K.F. 1964. Choosing the optimum cut-off grade. Colorado School Mines Q, 59, pp. 485-492.
- [6] Lane, K.F. 1988. The economic definition of ore: Cut-off Grades in Theory and Practice pp. 1-27, 56-108. Londres: Mining Journal Books Ltd.
- [7] León, O. 2009. Administración Financiera: Fundamentos y Aplicaciones (pp.1-36). Cali: Prensa Moderna Impresores S.A.
- [8] Li, Z. & Nieto A., 2012, Assessment tools, prevailing issues, and policy implications of mining community sustainability in China, International Journal of Surface Mining and Reclamation, IJSMR, Vol. 26, No, 2, pp. 148-162
- [9] Nieto, A. & Bascetin, A. 2006. Mining cutoff grade strategy to optimize NPV based on multiyear GRG iterative factor. Mining Technology, 115(3), pp. 1-6.
- [10] Nieto, A. & Zhang K. 2013, A Cut-Off Grade Economic Strategy for a By-Product Mineral Commodity Operation: A Rare Earth Case Study, Mining Technology, Vol. 122, No. 3, pp. 166-171, DOI:10.1179/1743286312Y.0000000025
- [11] Rendu, J.M. 2008. Introduction. An introduction to cut-off grade estimation pp. 1-3. United States of America: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- [12] Rendu, J.M. 2009. Cut-Off Grade Estimation – Old Principles Revisited – Application to Optimisation of Net Present Value and Internal Rate of Return pp. 165-169. Orebody Modelling and Strategic Mine Planning, Perth, WA

