



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE LANE PARA EL CÁLCULO DE LEY DE CORTE
CON INCLUSIÓN DE CONCEPTO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN MINERÍA A
CIELO ABIERTO**

POR

Francisco Ignacio Rojas Olate

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil de Minas

Profesor(es) Guía

Asieh Hekmat

Marzo 2024

Concepción (Chile)

© 2024 Francisco Ignacio Rojas Olate

© 2024 Francisco Ignacio Rojas Olate

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

RESUMEN

El presente informe aborda la evaluación de algoritmos de Lane creados por distintos investigadores, aplicados al cálculo de la ley de corte en minería a cielo abierto, considerando la incorporación del concepto de drenaje ácido de mina. El principal objetivo es comparar estos algoritmos, teniendo en cuenta los costos de tratamiento del drenaje ácido de mina, y evaluar cómo afectan al valor actual neto de una sección de una reserva de baja ley de cobre.

Se analizan tres modelos de algoritmo de Lane propuestos por Gholamnejad, Rashidinejad y Narrei, respectivamente. Cada uno de los modelos presentó diferentes variables y enfoques para calcular la ley de corte.

Los resultados demostraron que, si bien los modelos entregan una base sólida, todos presentan ciertas deficiencias. El modelo 1, consideró únicamente un costo asociado a la rehabilitación del drenaje ácido de mina sin tener en cuenta costos provocados al procesar minería de menor ley. El modelo 2, por su parte, consideró más variables, pero de igual forma requiere un cambio en los costos de procesamiento y refinación para entregar resultados más realistas. Finalmente, el modelo 3 entregó un modelo similar al anterior, pero con la adición de ingresos por la gestión y recuperación del rajo, lo que tuvo influencia en el VAN, pero no en la ley de corte.

Como conclusión, incorporar costos asociados al drenaje ácido de mina en el inicio del ciclo minero, como lo es en la ley de corte, permite una planificación más realista y mejorar la prevención y disminución de los impactos ambientales. Es por esto por lo que a cada uno de los modelos analizados se les sugieren recomendaciones específicas con la finalidad de mejorar su precisión y aplicabilidad a casos reales de minería.

ABSTRACT

This report addresses the evaluation of Lane algorithms created by different researchers, applied to the calculation of the cut-off grade in open pit mining, considering the incorporation of the concept of acid mine drainage. The main objective is to compare these algorithms, considering the treatment costs of acid mine drainage, and evaluate how it affects the net present value of a section of a low-grade copper reserve.

Three Lane algorithm models proposed by Gholamnejad, Rashidinejad and Narrei, respectively, are analyzed. Each of the models presented different variables and approaches to calculate the cut-off grade.

The results showed that, although the models provide a solid basis, they all have certain defects. Model 1, for its part, indicated only a cost associated with the rehabilitation of acid mine drainage without considering costs caused by processing lower grade mining. Model 2 showed more variables, but still requires a change in processing and refining costs to deliver more realistic results. Finally, model 3 provided a model similar to the previous one, but with the addition of income from pit management and recovery, which had an influence on the NPV, but not on the cut-off grade.

In conclusion, incorporating costs associated with acid mine drainage at the beginning of the mining cycle, as it is in the cut-off grade, allows for more realistic planning and improves the prevention and reduction of environmental impacts. This is why specific recommendations are suggested for each of the analyzed models in order to improve their precision and applicability to real mining cases.

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo general	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	Alcances y limitaciones del trabajo.....	3
1.3	Metodología de trabajo.....	3
2.	ANTECEDENTES.....	5
2.1	Impacto Ambiental de Botaderos	5
2.2	Tratamiento y prevención de Drenaje ácido de mina (DAM):.....	7
2.3	Efectos del DAM en costos:.....	10
2.4	Ley de corte y VAN:.....	12
2.5	Modelo de Lane:.....	13
	Modelo 1:.....	18
	Modelo 2:.....	19
	Modelo 3:.....	23
3.	DESARROLLO	28
3.1	Ley de corte de acidez.....	28
3.2	Revisión del modelo de bloques.....	28
3.3	Calculo ley de corte.....	30
3.3.1	Curva Tonelaje-Ley	30
3.3.2	Parámetros económicos.....	31
3.3.3	Capacidades.....	32
3.3.4	Leyes de corte económicas.....	32
3.3.5	Leyes de corte de equilibrio y ley óptima	33
3.3.6	VAN del proyecto.....	35

3.4	Calculo ley de corte con Modelo 1.....	36
3.4.1	Leyes de corte económicas.....	36
3.4.2	Cálculo de leyes de corte de equilibrio y ley óptima	37
3.4.3	VAN del proyecto.....	38
3.5	Cálculo de ley de corte con Modelo 2.....	38
3.5.1	Leyes de corte económicas.....	39
3.5.2	Leyes de corte de equilibrio y ley óptima	40
3.5.3	Cálculo del VAN	41
3.6	Cálculo ley de corte con modelo 3	41
3.6.1	Leyes de corte económicas.....	42
3.6.2	Leyes de corte de equilibrio y ley óptima	42
3.6.3	Calculo VAN	43
4.	RESULTADOS.....	44
4.1	Resultados modelo 1 y análisis de sensibilidad	44
4.2	Resultados modelo 2 y análisis de sensibilidad	47
4.3	Resultados modelo 3	48
4.4	Comparación de los 3 modelos	49
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
	REFERENCIAS	55

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Impacto ambiental causado por botaderos mineros [6]	6
Figura 2: Costos asociados a DAM en minas operativas de 1997 en Australia [9].....	11
Figura 3: Gráfico ejemplo selección ley de corte óptima, modificado de [15]	17
Figura 4: Esquema representación distintos destinos de material, modificado de [14]	20
Figura 5: Histograma de distribución de ley de cobre.....	30
Figura 6: Curva tonelaje vs ley sección de interés 2D	31
Figura 7: Resumen proceso de cálculo de leyes de corte de equilibrio.....	34
Figura 8: Gráfico beneficios vs ley de corte y ley de corte óptima.....	35
Figura 9: Variación del VAN con respecto al valor de “h” el cual representa su aumento con la línea azul presente	45
Figura 10: Gráfico variación del VAN según valor de "h" el cual se representa su aumento con la línea azul y su ley de corte	46
Figura 11: Variación del VAN para cada caso estudiado en el modelo 3	49
Figura 12: Ley de corte versus modelos de Rashidinejad y Narrei.....	50
Figura 13: VAN versus modelos de Rashidinejad y Narrei.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Costos por ha en dólar 1997 llevado a dólar actual de las minas estudiadas.....	11
Tabla 2 Costos anuales de los métodos de control [9].....	11
Tabla 3 Notación para el Modelo 1 [16].....	18
Tabla 4 Notación del modelo, modificado de [17]	20
Tabla 5 Notación del modelo, modificado de [18]	24
Tabla 6 Clasificación de material estéril en base a ley de corte de acidez	28
Tabla 7 Variables presentes en el modelo de bloques.....	29
Tabla 8 Análisis descriptivo ley de cobre	29
Tabla 9 Parámetros económicos de la mina.....	31
Tabla 10 Capacidades de la sección de interés	32
Tabla 11 Leyes de corte económicas	33
Tabla 12 Leyes de corte de equilibrio.....	34
Tabla 13 Leyes de corte económicas para cada valor de h.....	36
Tabla 14 Leyes de corte de equilibrio para cada valor de h	37
Tabla 15 Ley de corte óptima para cada valor de h.....	38
Tabla 16 Costos asociados a la eliminación de desechos y relaves PAF y NAF.....	39
Tabla 17 Leyes de corte económicas modelo 2 sin relaves	40
Tabla 18 Leyes de corte económicas modelo 2 con relaves	40
Tabla 19 Leyes de corte de equilibrio modelo 2 sin relaves.....	40
Tabla 20 Leyes de corte de equilibrio modelo 2 con relaves	40
Tabla 21 Valor leyes de corte económicas para cada % de ingresos considerado.....	42
Tabla 22 Valores leyes de corte de equilibrio para cada porcentaje de ingresos considerado	42
Tabla 23 Ley de corte óptima para cada valor de "h"	44
Tabla 24 VAN para cada valor de "h"	44
Tabla 25 Valores de recuperación asignados para cada valor de "h".....	46
Tabla 26 Valor de VAN para cada valor de "h"	46
Tabla 27 Valores "u" y "v" en el análisis de sensibilidad	47
Tabla 28 Ley de corte y VAN análisis de sensibilidad	48
Tabla 29 Ley de corte óptima para cada porcentaje de ingresos	48
Tabla 30 Valor de VAN para cada caso	48

Tabla 31 Resumen todos los resultados obtenidos 49

GLOSARIO

DAM: Drenaje ácido de mina

PAF: Potential Acid Formation (Potencial generador de ácido)

NAF: No Acid Formation (No generador de ácido)

Cu: Cobre

FeS₂: Pirita

USD: Dólar estadounidense

Ton: Tonelada

MT: Millón de tonelada

Tpd: Tonelada por día

Tpa: Tonelada por año

REM: Relación estéril mineral

NPV: Valor actual neto (VAN)

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país abundante en recursos minerales, razón por la cual la industria minera ha sido uno de los motores más importantes para el crecimiento económico. Según Lardé, Chaparro y Parra (2008), esta industria participa actualmente en aproximadamente un 8% en la generación del producto interno bruto, alrededor del 16% en la formación bruta de capital fijo, el 43% de la inversión extranjera directa y el 66% del total de las exportaciones de bienes [1], siendo el cobre el principal mineral producido a nivel nacional, convirtiendo a Chile en el máximo productor mundial. alcanzando una exportación de 572 MT de cobre para enero de 2021 [2].

Sin embargo, pese a la importancia de la industria en el país, esta genera un alto impacto a nivel ambiental debido a los procesos de extracción invasivos utilizados por la misma. En función de esto, la generación de drenaje ácido de mina en los botaderos constituye uno de los principales impactos ambientales generados por la actividad minera, el cual es una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas del mundo [3].

El drenaje ácido de mina, también abreviado como DAM, es generado cuando materiales con contenidos sulfurosos entran en contacto con agua y oxígeno, estableciendo daños nocivos para la actividad biológica [4], siendo la pirita el principal precursor de este. El DAM contiene una gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido en sulfato y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.), alcanzando las decenas y centenas de miligramos por litro. Estos elementos son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces, y, además, esas aguas pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones.

En el proceso minero, el material es seleccionado entre minerales y desechos, siendo la ley de corte el concepto que realiza esta discriminación. Es decir, cualquier bloque que posea menos ley que la ley de corte será enviado a botaderos. Cabe mencionar que, en muchas ocasiones, los materiales destinados a los botaderos contienen un alto porcentaje de pirita, o metales pesados, lo cual aumenta la probabilidad de generación de drenaje ácido.

Con el pasar del tiempo, la minería se ha enfrentado a diversas adversidades en su desarrollo. En la actualidad, la problemática de trabajar con leyes de corte más bajas se presenta como una alternativa viable debido al alto precio del cobre y a los avances tecnológicos que existen [5]. Sin

embargo, esta operación provoca un aumento en la probabilidad de la generación de DAM, ya que cada vez son más los materiales sin valor económico que es necesario remover para obtener el mineral.

Provocado por el aumento de los desechos y la mayor probabilidad de generación de drenaje ácido, es imprescindible considerar los costos de prevención, tratamiento y rehabilitación del drenaje ácido al momento de realizar la planificación de la mina. Esto resultaría en una menor probabilidad de generación y un buen manejo del drenaje ácido, lo cual, a su vez, conduce a menores gastos.

De acuerdo con lo ya mencionado, el presente estudio busca hacer énfasis en la consideración de los costos de drenaje al momento de calcular la ley de corte de un proyecto, utilizando el modelo de Lane. Para el desarrollo de este, se calculó la ley de corte de una mina de cobre con porcentajes de piritas presentes. Del mismo modo, se aplicaron metodologías de distintos autores que buscaban incorporar estos costos al modelo aludido con anterioridad, analizando sus conclusiones.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Comparar los algoritmos de Lane que calculan ley de corte considerando los costos de tratamiento o rehabilitación de drenaje ácido de mina en botaderos y evaluar los efectos en el VAN de una reserva de baja ley de cobre, con el fin de proponer recomendaciones en sus metodologías específicas para mejorar su aplicabilidad a casos de estudio reales.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudio y clasificación de los impactos ambientales de los botaderos para determinar si el DAM es el efecto más significativo.
- Analizar los factores que influyen en la generación de drenaje ácido de mina en los botaderos.
- Calcular ley de corte en modelo de bloques de la mina de interés aplicando el algoritmo de Lane.
- Calcular ley de corte de la mina con metodología propuesta de diversos autores que incluyeron drenaje ácido de mina.
- Comparar los resultados de cada metodología y analizar los efectos en el VAN del proyecto.
- Sugerir recomendaciones para cada uno de los modelos de estudio

1.2 Alcances y limitaciones del trabajo

Para el presente estudio se toman algunas consideraciones, las cuales vendrían siendo:

- Los parámetros económicos se consideran constantes durante todo el tiempo de la mina.
- Se considera un corte de la reserva (Modelo 2D) para poder ver mejor los cambios y trabajar con igual tamaño de todos los bloques.
- Los costos de rehabilitación y control no son costos reales y se definen por evaluación de reserva.
- El alcance del estudio está definido por su carácter meramente académico y por lo tanto los resultados expuestos deben ser tomados con cautela.

1.3 Metodología de trabajo

La investigación llevada a cabo en este trabajo debe cumplir con tres etapas principales para lograrse exitosamente, las cuales son la etapa de información, cálculos y conclusiones.

Etapa de información: en base al modelo de bloques de una mina de baja ley de cobre proporcionado por la exploración, se lleva a cabo su análisis descriptivo. Esto incluye la construcción de la curva tonelaje vs ley con el objetivo de interpretar de manera más precisa los datos. Además, mediante el uso de Excel, se realiza un reemplazamiento de datos sin información en la ley de cobre, asumiéndolos como ley 0.

Etapa de cálculos: a través de Excel, se aplica el modelo de Lane con el objetivo de calcular la ley de corte del yacimiento. Posteriormente, basándose en otros autores que han abordado modelos de Lane actualizados incorporando costos de rehabilitación o tratamiento del drenaje ácido de mina, se calcula una nueva ley de corte con sus respectivas metodologías.

Etapa de conclusiones: se analizan los resultados obtenidos al incluir el costo de probabilidad de generar drenaje ácido de mina en el cálculo de la ley de corte. Se interpreta su impacto en el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto y en la ley de corte en sí, estableciendo comparaciones. Finalmente, se presentan las recomendaciones derivadas de la investigación.

Estas tres etapas principales, a su vez, se dividen en cinco subetapas con objetivos más específicos necesarios para que la investigación cumpla su propósito. Estas subetapas son:

1. Revisión bibliográfica (capítulo 2):

Se recopila información sobre el drenaje ácido de mina (DAM), abarcando aspectos de prevención, tratamiento y formación de dicho impacto. Además, se lleva a cabo una búsqueda de información con el objetivo de estimar los costos asociados al tratamiento del DAM. Asimismo, se investigará la optimización de la ley de corte mediante el modelo de Lane y se realizará un análisis de riesgo.

2. Cálculo de ley de corte (capítulo 3.3):

Se desarrolla un modelo de optimización de la ley de corte utilizando el modelo de Lane. Este modelo es aplicado a un modelo de bloques de un yacimiento que contiene cobre y ciertos porcentajes de pirita.

3. Cálculo ley de corte con DAM (capítulo 3.4-3.6):

Después de calcular la ley de corte con el modelo de Lane, se determina una nueva ley de corte basada en artículos publicados por diversos autores. Estos artículos incluyen un costo de tratamiento, prevención o recuperación del DAM. El objetivo es comprobar las conclusiones de dichos autores.

4. Comparación entre leyes de corte (capítulo 4):

Se comparan los resultados obtenidos en el punto anterior con los obtenidos mediante el modelo de Lane sin modificaciones. El análisis se centra en el impacto que tiene la incorporación de dichos costos en el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto.

5. Resultados y conclusiones (capítulo 5):

Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos. Se concluye si la metodología propuesta cumple con los objetivos planteados y si es viable su aplicación en proyectos mineros con el fin de disminuir el impacto del DAM.

2. ANTECEDENTES

2.1 Impacto Ambiental de Botaderos

La minería es una de las industrias más importantes del mundo para un desarrollo sustentable, ya que sin ella no sería posible el avance en nuevas tecnologías más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, esta industria, a su vez, es altamente destructiva, generando daños muchas veces irreparables al extraer yacimientos. Como señala Pashkevich (2017), estos daños irreparables afectan el equilibrio de distintos ecosistemas implicados en proyectos específicos, debido a la emisión de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

Pashkevich (2017) afirma: "Las plantas de minería y procesamiento se posicionan entre las industrias más dañinas para la naturaleza, provocando daños irreversibles al equilibrio del ecosistema; dichas plantas son las fuentes más intensas de contaminación ambiental, con residuos sólidos, líquidos y gaseosos" [5].

En el entorno minero, los botaderos son responsables de provocar transformaciones en los paisajes, reducir el área agrícola, contaminar el suelo, intensificar la erosión y empeorar el estado de la atmósfera [6].

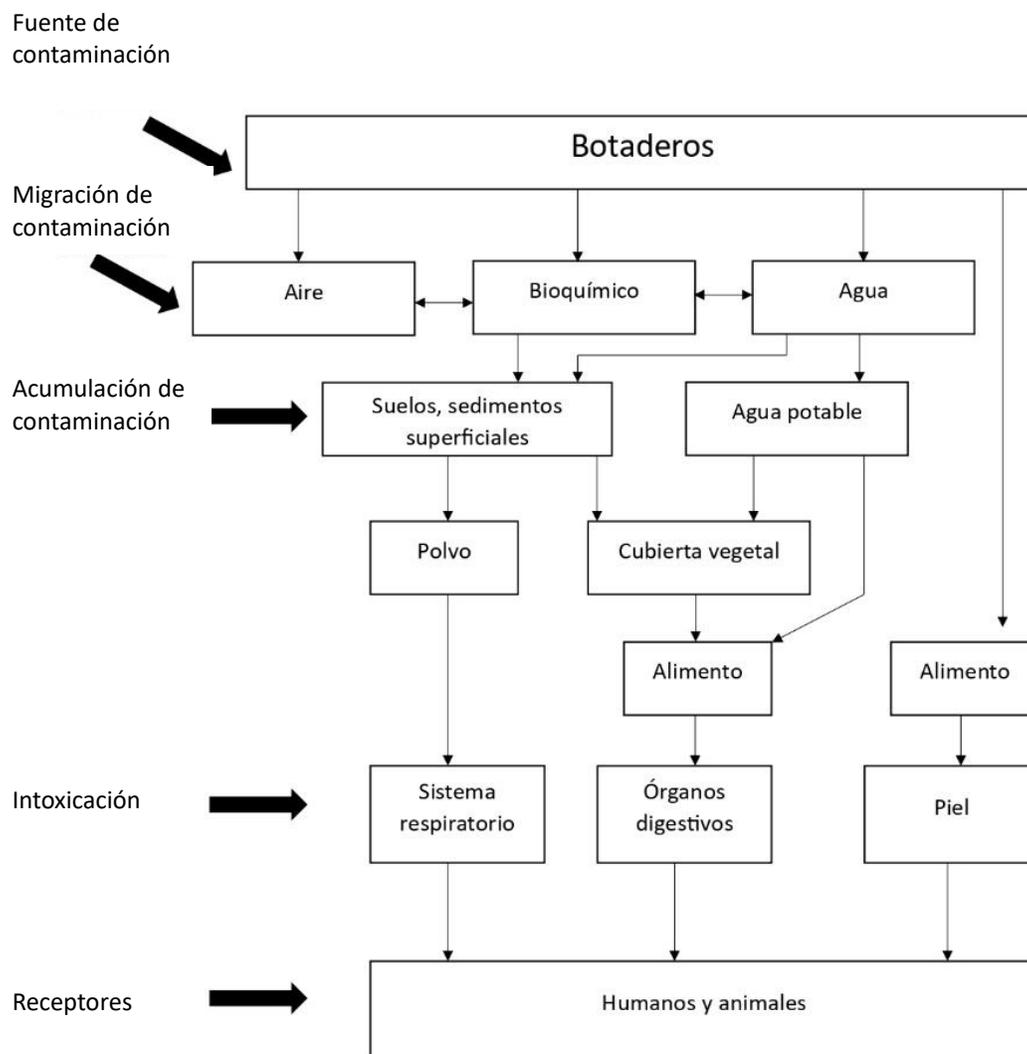


Figura 1: Impacto ambiental causado por botaderos mineros [6]

En relación con la población humana y animal, también se ven afectados por los impactos ambientales de los botaderos mencionados. Esto se puede observar en la Figura 1, donde se muestra que los humanos son directamente afectados a través del agua que consumen, los alimentos que ingieren y el aire que respiran.

Como se mencionó anteriormente, los botaderos provocan un impacto ambiental negativo en los suelos. Algunos de estos impactos incluyen:

- Cambios irreversibles en la estructura y composición del suelo, disminución de la resistencia mecánica y estabilidad del agua de los agregados, seguida por el deterioro de las propiedades agro-

físicas de los suelos; dilución de humus y sales contenidas en el suelo; un cambio en su capacidad de retención de agua.

- Cambios irreversibles en la composición, estructura y propiedades de rocas potencialmente fértiles
- Salinización del suelo e intoxicación de plantas.
- Polvo y contaminación del aire.
- Deterioro de las propiedades físicas y mecánicas de las rocas utilizadas para construcciones mineras como represas, terraplenes.

El impacto ambiental de los botaderos es sobre muchas componentes ambientales, lo cual conduce indirectamente a un deterioro de los indicadores de salud de las personas. Dichos efectos tienen tres vías para llegar al ser humano: oral, a través del tracto respiratorio y de la piel [6].

Los botaderos tienen un impacto significativo en la salud de las personas, el cual puede representarse mediante la reducción de la esperanza de vida, el aumento de la incidencia en enfermedades respiratorias y cardiovasculares, la mortalidad infantil y las malformaciones congénitas [6].

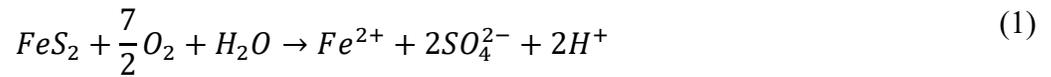
Por último, los botaderos afectan las siguientes componentes del paisaje: topografía, clima, aguas superficiales y subterráneas, suelos y sedimentos, vegetación y vida silvestre. Además, el impacto de los paisajes visuales en un ser humano se caracteriza por su percepción visual e impactos directos. Los indicadores principales de la visibilidad del paisaje que se ven afectados por los botaderos son: topografía del terreno, estructura geológica, suelo superficial, hidrografía, clima y vegetación. Por lo tanto, es posible concluir que los botaderos mineros disminuyen el valor paisajístico, degradando su visibilidad, lo cual impacta directamente a los seres humanos [6].

2.2 Tratamiento y prevención de Drenaje ácido de mina (DAM):

El Drenaje Acido de Mina (DAM) es uno de los impactos ambientales más significativos dentro de los botaderos. Este es producido cuando el material con propiedades sulfúricas es expuesto a la presencia de oxígeno, ya sea en el agua o aire. Dicho proceso puede ser acelerado gracias a la participación de bacterias naturales presentes en los botaderos, ya que estas ayudan en la descomposición de los minerales sulfurados.

Según Aksil y Koldas (2005), las reacciones de posible generación de ácido se representan de manera más precisa mediante la investigación de la oxidación de la pirita (FeS_2), debido a que este

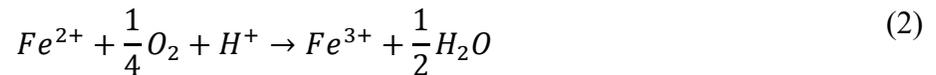
mineral es uno de los sulfuros más comunes. A continuación, se presenta la reacción química de la oxidación de la pirita [7].



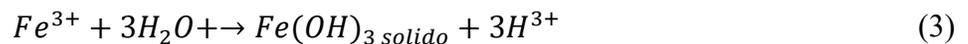
En donde el Fe^{2+} , SO_4^{2-} disuelto y el H^+ representa el aumento de los sólidos totales disueltos junto con un aumento en la acidez del agua.

Por otro lado, si el entorno circundante es lo suficientemente oxidante (dependiendo del O_2 , pH y actividad bacteriana), la mayor parte del hierro ferroso se oxidará a hierro férrico.

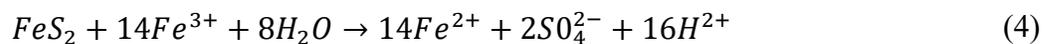
Esta reacción es expresada de la siguiente manera:



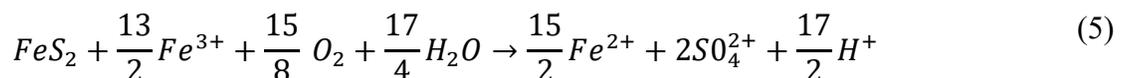
Luego de eso con valores bajos de pH entre 2,3 y 3,5, el hierro férrico precipita para formar el $Fe(OH)_3$ y la jarosita ($KFe_3(OH)_6(SO_4)_2$), lo cual provoca que se deje poco Fe^{3+} en la solución, y a su vez, implica una reducción del pH:



Si el Fe^{3+} de la ecuación 2 no se precipita de la solución mediante la ecuación 3 puede ser utilizado para oxidar pirita adicional, de acuerdo con la siguiente reacción:



Por otro lado, la ecuación general que describe al hierro férrico estable utilizado para oxidar la pirita adicional nace de la combinación de la ecuación 1 y 3, la cual es la siguiente:



Todas estas ecuaciones, con excepción de la 2 y 3, suponen que el mineral oxidado es la pirita y el oxidante es el oxígeno, debido a que es el mineral más común dentro de las menas. Sin embargo,

existen otros minerales de sulfuro como la pirrotita (FeS) y la calcocita (Cu_2S) que tienen otras proporciones de sulfuro metálico y con metales distintos al hierro. Estos oxidantes y minerales de sulfuro poseen velocidades, estequiometría y vías de reacción distinta, pero que no han sido investigadas a mayor detalle como es el caso de la pirita.

Algunos de los principales parámetros que determinan la tasa de generación de ácido incluye: el pH, temperatura, contenido de oxígeno en la fase gaseosa y acuosa, grado de saturación con agua, actividad química de Fe^{3+} , área de superficie de sulfuro de metal expuesto, energía de activación química requerida para iniciar la generación de ácido y, por último, la actividad bacteriana.

El agua se presenta como el principal medio de transporte de los contaminantes; por lo tanto, todas las medidas de control a la migración del DAM se centran en el control del flujo de agua. Para controlar la entrada de agua en el sitio de generación de ácido, se llevan a cabo acciones como el desvío de aguas superficiales que fluyen hacia el lugar propenso a la generación de ácido, la prevención de la infiltración de aguas subterráneas en el área contaminada, la inhibición de la filtración hidrológica en las zonas afectadas y la disposición controlada de residuos generadores de ácido.

“Los métodos de neutralización interna son la técnica ambiental disponible más efectiva para mitigar el DAM junto con las coberturas de agua y los procesos de degradación biológicos/naturales” [8]. Los productos químicos comúnmente utilizados para el tratamiento del DAM incluyen piedra caliza, cal hidratada, ceniza de soda, soda caústica, peróxido de calcio, amoníaco y cenizas volantes.

El proceso de neutralización utilizando cal, que es el método más comúnmente empleado, el drenaje ácido de mina se introduce directamente en una cámara de mezcla rápida. En esta cámara, se añade cal hidratada en forma seca o como una lechada. Cuando las concentraciones de hierro ferroso son bajas ($>50 \text{ mg/L}$), se ajusta el pH a un rango de 6,5 a 8,0 y luego el agua se dirige directamente a una cámara de sedimentación para su clarificación. En el caso de concentraciones más altas, con un pH entre 8 y 10, el agua pasa por un tanque de aireación donde el precipitado de hidróxido ferroso se transforma en hidróxido férrico. Posteriormente, el agua se dirige a una cámara de sedimentación donde los metales pesados se precipitan fuera de la solución. A pesar de que la piedra caliza suele ser un reactivo económico y su uso resulta en menor generación de lodo, su aplicación no es tan extendida, principalmente debido a que el dióxido de carbono amortigua la reacción, lo que dificulta elevar el pH por encima de 6.

2.3 Efectos del DAM en costos:

Los tipos de costos derivados del drenaje ácido de mina pueden ser divididos en costos operacionales, costos de rehabilitación inesperados y costos de remediación de sitios históricos [8].

- **Costos operacionales:**

Se asocian al manejo de materiales potencialmente generadores de ácido. Esto puede lograrse a través de un manejo selectivo, la aplicación de coberturas, la encapsulación o la realización de una caracterización y planificación adecuada. De esta manera, se gestionaría la eliminación de residuos que tienen el potencial de generar ácido.

- **Costos de rehabilitación inesperados:**

Aparecen cuando el drenaje ácido de mina se presenta tarde en la vida útil de la mina o después del cierre de la operación. La probabilidad de que ocurra DAM es potencialmente mayor si no se ha realizado una caracterización adecuada de los desechos ni se ha incorporado la gestión de los desechos sulfurosos en las operaciones mineras.

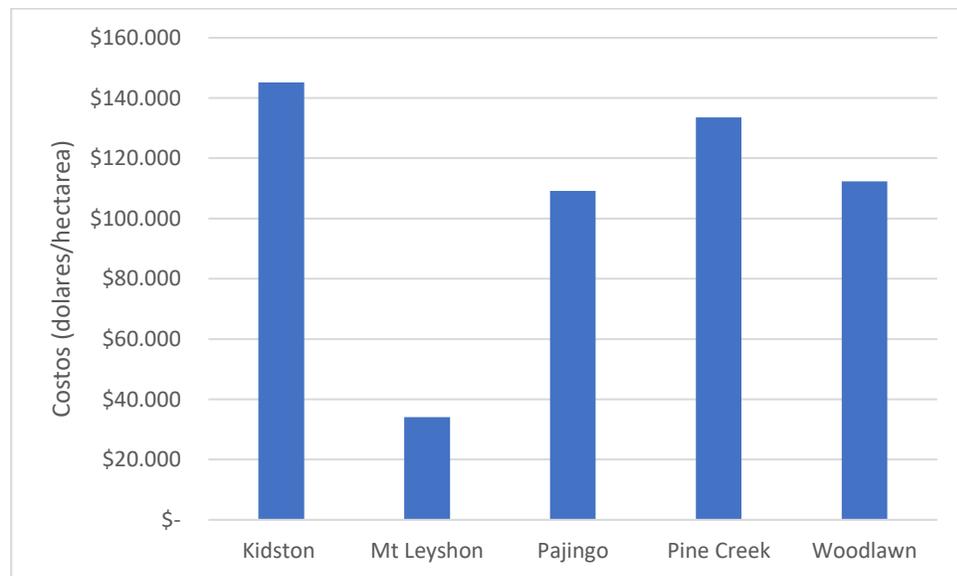
- **Costos de remediación de sitios históricos:**

Los sitios históricos cerrados en los que no se llevó a cabo una rehabilitación adecuada representan casos de gran responsabilidad para las comunidades y gobiernos. Estos han tenido que asumir la responsabilidad de abordar la eliminación de los efectos en sitios históricos debido a la falta de políticas públicas, como las normas ambientales establecidas en la actualidad. Después de definir los tipos de costos, Harries (1997) realizó un estudio que incluyó una revisión de minas en Australia, recopilando información sobre los costos asociados a prevenir, tratar y rehabilitar el DAM en minas operacionales. En contraste, para los sitios históricos, solo se presentan costos asociados con la eliminación del drenaje ácido. Con el propósito de cuantificar en valor presente, se realizó una conversión siguiendo la tasa de cambio proporcionada por la página "Dinero en el Tiempo", que indica que \$1 australiano equivale a \$2,19 en 2023 [9].

Los costos de cada una de las minas estudiadas por Harries se representan en dólares por hectárea en la Tabla 1. Es importante señalar que, para la fecha del estudio, todas las minas, a excepción de Pine Creek, estaban en funcionamiento. Además, para un análisis más completo, la Figura 2 presenta un gráfico de barras de dichos valores, donde es evidente que la mina de Kidston y Pajingo son las que tienen los costos más elevados en relación con las otras minas.

Tabla 1 Costos por ha en dólar 1997 llevado a dólar actual de las minas estudiadas

Mina	Costos por ha en el año 1997	Costos por ha en el año 2023
Kidston	\$68.500	\$145.220
Mt Leyshon	\$16.100	\$34.132
Pajingo	\$51.500	\$109.180
Pine Creek	\$63.000	\$133.560
Woodlawn	\$53.000	\$112.360

**Figura 2: Costos asociados a DAM en minas operativas de 1997 en Australia [9].**

Los métodos de control utilizados en el estudio australiano fueron cubiertas, manejo selectivo, tratamiento de agua y análisis de muestras. Los costos anuales se estimaron en base a un costo operacional por hectárea, el cual fue posteriormente multiplicado por el área utilizada de las respectivas minas que aplicaron dicho método. Los resultados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Costos anuales de los métodos de control [9]

Trabajo	Costo anual en 1997	Costo anual en 2023
Cubiertas	\$35.000.000	\$74.200.000
Manejo selectivo	\$16.500.000	\$34.980.000
Análisis de muestras	\$7.000.000	\$14.840.000
Tratamiento de aguas	\$14.000.000	\$29.680.000
Total	\$72.500.000	\$153.700.000

2.4 Ley de corte y VAN:

Uno de los temas más importantes para el proyecto de una mina es la ley de corte, que es simplemente una norma utilizada para asignar el destino del material extraído: dejarlo en su lugar, enviarlo a la planta de procesamiento de minerales, lixiviar o enviarlo al vertedero [10].

Esta política de ley de corte es la encargada de discriminar entre mineral y estéril. La ley de corte se determina gracias a factores económicos como el precio de los metales, el costo asociado a la mina, los costos fijos, la tasa de producción (capacidad de la mina), entre otros. No obstante, también depende de factores metalúrgicos, tales como el tipo de material, el procesamiento, las capacidades, las recuperaciones, entre otros.

A lo largo del tiempo, se han creado múltiples modelos matemáticos con el fin de encontrar la ley de corte que maximice el beneficio de un proyecto minero (VAN). Esta ley de corte tiene una solución única y es variable en el tiempo, ya que depende de costos asociados al tiempo, como los precios, las recuperaciones, etc.

Por otro lado, el Valor Actual Neto o VAN de un proyecto es el valor presente de los flujos de efectivos netos de una propuesta. Con el fin de actualizar estos flujos netos, se utiliza una tasa de descuento, que es una medida de rentabilidad mínima exigida por el proyecto que permite recuperar la inversión, cubrir los costos y además dejar un beneficio [11]. Para realizar su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$VAN = \left[\sum_{t=1}^n FE(t) * (1 + i)^{(0-t)} \right] + I(0) \quad (6)$$

Donde:

VAN: Valor Actual Neto

FE (t): Flujo de efectivo neto en el periodo t

i: Tasa de expectativa u oportunidad

I (0): Inversión inicial

- **Criterio de aceptación:**

De ser el caso en que el VAN de un proyecto es mayor o igual a 0 el proyecto será económicamente rentable y se acepta, de lo contrario se rechaza. Por otro lado, en el caso de que los proyectos son mutuamente excluyentes, debe elegirse el que presente el VAN mayor. Es importante señalar que un VAN negativo no necesariamente indica que no se están adquiriendo beneficios, sino que evidencia una de estas situaciones: o bien no se están obteniendo beneficios o estos no alcanzan a cubrir las expectativas del proyecto. Por lo tanto, un VAN igual a 0 no significa que no existan beneficios, sino que apenas se alcanzan a cubrir las expectativas.

En conclusión, el VAN es útil para realizar comparaciones entre proyectos mutuamente excluyentes, incluso si presentan inversiones diferentes.

Para los efectos de este informe, se utilizará el modelo de leyes de corte óptimas establecido por Kenneth Lane [12], el cual será definido en el siguiente ítem del marco teórico.

2.5 Modelo de Lane:

Una de las grandes temáticas dentro de la planificación minera es el problema de calcular la ley de corte para un yacimiento, como se explicó en el punto anterior. Esta ley desempeña un papel fundamental al estimar el beneficio que puede obtenerse de una mina.

Kenneth Lane fue quien revolucionó la industria minera, no obstante, antes de sus investigaciones, el primer intento de calcular una ley de corte fue realizado por Vickers en el año 1961[13], quien consideró un yacimiento totalmente homogéneo. Posteriormente, Henning en el año 1963[14] presentó un modelo matemático que representaba de manera simple el yacimiento con parámetros constantes. Ambos tenían muchas deficiencias, siendo la más importante la falta de consideración de la distribución del yacimiento, centrándose solo en parámetros económicos.

Lane, amplió el trabajo de Vickers y Henning de tres maneras significativas. En primer lugar, Lane representó los yacimientos de una manera más realista al suponer que se pueden subdividir en regiones homogéneas o incrementos, que se pueden extraer en un orden lineal predefinido. Además, cada incremento se caracteriza por una función de distribución de leyes, similar a la presentada por Vickers. En segundo lugar, Lane reconoce que el valor del dinero cambia con el tiempo al introducir la noción de un factor de descuento. También incorpora límites sobre la cantidad de material que se puede extraer, procesar y refinar durante cada período de tiempo. En tercer lugar, Lane describe un algoritmo que se puede utilizar para resolver su modelo y lo ilustra con algunos pequeños ejemplos hipotéticos. Su algoritmo ajusta la ley de corte utilizada en cada período de tiempo, similar a Henning, pero tiene en cuenta una representación más detallada de la mina. Posterior a esto, Lane en 1988 extendió aún más su trabajo con el fin de incorporar el caso de múltiples materiales y múltiples procesadores. Escribió un libro en donde explica su método de una manera más general y describió extensiones a múltiples metales y pilas de almacenamiento. El modelo se alinea con el objetivo general de una operación minera, ya que maximiza el VAN sujeto a las limitaciones de capacidad de extracción, procesamiento y refinación [15].

A continuación, se presenta la formulación matemática general del modelo de Lane:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{P_t}{(1+d)^t} \quad (7)$$

$$P_t = (s-r)Qr_t - mQm_t - pQc_t - f_t \quad (8)$$

Sujeto a

$$Qm_t \leq M \forall t$$

$$Qc_t \leq C \forall t$$

$$Qr_t \leq C \forall t$$

Donde P_t es el beneficio realizado por la mina donde Qm cantidad de materia total minado, Qc es la cantidad de mineral procesado y Qr es la cantidad de mineral refinado vendido durante el periodo de tiempo t y por último d es la tasa de descuento. Por lo tanto, a lo largo de la vida útil de la mina (T)

el modelo tiene como objetivo definir un programa de leyes de corte $\{y_t \dots Y_t\}$, de modo que se maximice el VAN satisfaciendo las restricciones.

En función de esto, se establecen las leyes de corte correspondientes a cada una de las capacidades. Esta asignación se realiza en virtud de que cada capacidad representa una restricción que incide directamente en el tiempo del proyecto (T) de la ecuación (6). Por consiguiente, estas capacidades son tratadas como limitaciones y dan lugar a la formulación de las siguientes ecuaciones [15].

$$g_m = \frac{c}{(s - r) * y} \quad (9)$$

$$g_c = \frac{c + \frac{f}{C}}{(s - r) * y} \quad (10)$$

$$g_r = \frac{c}{[(s - r) - f/R] * y} \quad (11)$$

Donde:

y: Recuperación

m: Costo de minado en términos de \$ por tonelada de material removido

c: Costos de procesamiento en términos de \$ por tonelada de material concentrado.

r: Todos los costos incurridos en la etapa de producto y venta. Estos costos se reportan en términos de \$ por unidad de producto.

f: Costos fijos durante el periodo de producción.

M: Máxima capacidad de minado en términos de toneladas por año.

C: Máximo capacidad de procesamiento en términos de toneladas por año.

R: Máxima capacidad de refinería y/o comercialización en términos de libras por año.

Cantidades: Q_m es cantidad de material de minado, Q_c es cantidad de material procesado, Q_r cantidad de producto vendido

Luego de esto define las leyes de corte de equilibrio dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q_m}{M} = \frac{Q_c}{C} \text{ Si la mina y la concentradora están en equilibrio.}$$

Por lo tanto, la ley de corte óptima que satisface la mina y planta a la vez es (G_{mc}):

$$G_{mc} = g_m \quad \text{si, } g_{mc} \leq g_m$$

$$G_{mc} = g_c \quad \text{si, } g_{mc} \geq g_c$$

$$G_{mc} = g_{mc} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{mc} = \text{Mediana}(g_{mc}, g_c, g_m)$.

$$\frac{Q_m}{M} = \frac{Q_r}{R} \text{ Si la mina y la refinera están en equilibrio.}$$

Por lo tanto, la ley de corte óptima que satisface la planta y refinera a la vez es (G_{rc}):

$$G_{rc} = g_r \quad \text{si, } g_{rc} \leq g_r$$

$$G_{rc} = g_c \quad \text{si, } g_{rc} \geq g_c$$

$$G_{rc} = g_{rc} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{rc} = \text{Mediana}(g_{rc}, g_c, g_r)$.

$$\frac{Q_c}{C} = \frac{Q_r}{R} \text{ Si la concentradora y la refinera están en equilibrio.}$$

Por lo tanto, la ley de corte óptima que satisface a la mina y la refinera a la vez es (G_{mr}):

$$G_{mr} = g_m \quad \text{si, } g_{mr} \leq g_m$$

$$G_{mr} = g_r \quad \text{si, } g_{mr} \geq g_r$$

$$G_{mr} = g_{mr} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{mr} = \text{Mediana}(g_{mr}, g_m, g_r)$.

Modelo 1: En el año 2008, Gholamnejad presenta un modelo de Lane actualizado que incorpora el costo de rehabilitación del drenaje ácido de mina [16].

En dicho modelo, se definió un nuevo costo llamado "h", que por definición es el costo de rehabilitación por tonelada de material rehabilitado de un determinado tipo de roca después de haber sido vertida como desecho. La notación para el modelo es la siguiente:

Tabla 3 Notación para el Modelo 1 [16]

Notación	Definición	Unidad	Observaciones
M	Capacidad de la mina	Ton/año	
C	Capacidad de la planta	Ton/año	
R	Capacidad de la refinería	Ton/año	
m	Costo mina	\$/ton de material	Mineral+Desecho
c	Costo planta	\$/ton de mineral	
r	Costo refinería	\$/ton de mineral refinado	
h	Costo de rehabilitación	\$/ton de material rehabilitado	
f	Costos fijos	\$/año	
y	Recuperación	%	
s	Precio de venta	\$/unidad de producto	
Q_m	Cantidad de material extraído	Ton/año	
Q_c	Cantidad de material procesado	Ton/año	
Q_r	Cantidad de material refinado	Ton/año	

La cantidad de material que es enviado a botadero se puede calcular como $Q_m - Q_c$. Una vez explicado esto, la ecuación de beneficio a maximizar es la siguiente:

$$P = sQ_r - [mQ_m + cQ_c + rQ_r + fT + (Q_m + Q_c)h] \quad (12)$$

Las leyes de corte económicas son definidas por la maximización de la ecuación anterior con respecto a la capacidad limitante para cada caso y definiendo el tiempo como $T = \text{Cantidad de material} / \text{Capacidad limitante}$, obteniendo como resultado las siguientes ecuaciones para determinarlas.

- Si la capacidad mina es el factor que restringe:

$$g_m = \frac{c - h}{(s - r) * y} \quad (13)$$

- Si la capacidad planta es el factor que restringe:

$$g_c = \frac{c + \frac{f}{C} - h}{(s - r) * y} \quad (14)$$

- Si la capacidad de refinería es el factor limitante:

$$g_r = \frac{c - h}{[(s - r) - f/R] * y} \quad (15)$$

Mantuvo las relaciones en situación de capacidades en equilibrio y definió una nueva ecuación de beneficio incluyendo h:

$$v = (s - r)Q_r - (m + h)Q_m - (c - h)Q_c - T(f + Vd) \quad (16)$$

Además, concluyó que considerar dicho costo de rehabilitación puede disminuir la ley de corte. De igual forma, se reduce la cantidad de mineral que es enviado a la concentradora; por lo tanto, también se reduce el material enviado a botadero. Finalmente, al disminuir el material enviado a botadero, se reduce el costo total de rehabilitación durante y después de la extracción del material, lo cual incrementa el VAN total del proyecto.

Modelo 2: Rashidinejad, en el año 2008, presentó un modelo de Lane que incorpora costos asociados al drenaje ácido de minas, dependiendo de los materiales generadores y no generadores de ácido que son enviados a botadero o tranques de relaves [17].

Para ello, basándose en la Figura 4, se explican los diversos destinos que poseen los materiales en la mina. Después de ser minado, el material debe seleccionarse para ser enviado a procesar o al botadero. En caso de ser enviado a procesar, se generan desechos que deben depositarse en tranques de relaves.

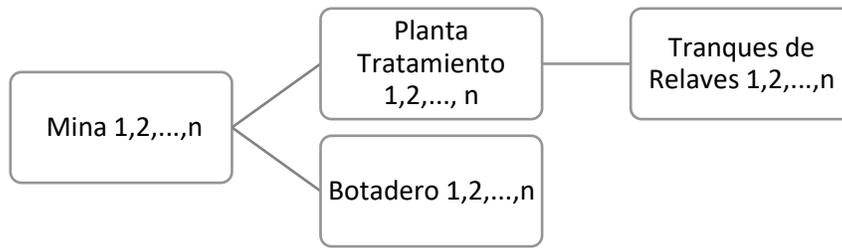


Figura 4: Esquema representación distintos destinos de material, modificado de [14]

Además, en base a un estudio realizado en Canadá en 1995 se estimó que los costos de desechos de relaves y botaderos productores de ácido son de 0.81 \$/ton y 0.54 \$/ton respectivamente [14].

Una vez explicado esto, la notación para el modelo es la siguiente:

Tabla 4 Notación del modelo, modificado de [17]

Notación	Definición	Unidad	Observaciones
I	Indicador de año	-	
N	Vida de la mina	años	
S	Precio mineral	\$/ton producto	
M	Capacidad de la mina	Ton/año	
C	Capacidad de la planta	Ton/año	
R	Capacidad de la refinería	Ton/año	
m	Costo mina	\$/ton de material	Mineral+Desecho
a	Costo eliminación desechos NAF	\$/ton de desecho	Botadero 1
b	Costo eliminación desechos PAF	\$/ton de desecho	Botadero 2
c	Costo refinería	\$/ton de mineral	
u	Costo de eliminación de relaves NAF	\$/ton de relave	Tranque 1
v	Costo de eliminación de relaves PAF	\$/ton de relave	Tranque 2
R	Refinería/Ventas/Gastos generales	\$/ton de producto	
F	Costos fijos	\$/año	
G	Ley media	%	
y	Recuperación	%	
d	Tasa de descuento	%	
N	Valor actual incremental	\$/año	
Qm	Cantidad de material extraído	Ton/año	
Qc	Cantidad de material procesado	Ton/año	
Qr	Cantidad de material refinado	Ton/año	
A	Material NAF extraído y enviado a botadero 1	%	
B	Material PAF extraído y enviado a botadero 2	%	
U	Relave NAF enviado a tranque 1	%	
V	Relave PAF enviado a tranque 2	%	

En función de esto y con el objetivo de simplificar el modelo, se consideran 2 botaderos y 1 planta con 2 tranques de relave. En este esquema, los desechos no generadores de ácido y los generadores de ácido son separados y enviados a los botaderos 1 y 2, respectivamente.

Del mismo modo, los relaves PAF y NAF son dirigidos a los tranques 1 y 2. Posterior a eso se presenta la ecuación para maximizar el VAN de la siguiente forma:

$$Max\ VAN = \left(\sum_{i=1}^N \frac{v_i}{(1+d)^i} \right) \quad (17)$$

Donde:

$$v_i = (S_i - r_i) * Qr_i - m_i * Qm_i - a_i * A_i * (Qm_i - Qc_i) - b_i * B_i * (Qm_i - Qc_i) - c_i * Qc_i - u_i * U_i * (Qc_i - Qr_i) - v_i * V_i * (Qc_i - Qr_i) - (f + d * NPV_i) * T \quad (18)$$

Siguiendo las siguientes restricciones:

$$Qm_i \leq M \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Qc_i \leq C \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Qr_i \leq R \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Qr_i = g * y * Qc_i$$

$$A_i + B_i = 1 \text{ y } U_i + V_i = 1$$

Se definen las leyes de corte en base a la capacidad que limita la operación:

Si la capacidad de la mina es el limitante, entonces:

$$g_m = \frac{c_i - a_i * A_i - b_i * B_i + u_i * U_i + v_i * V_i}{(S_i - r_i + u_i * U_i + v_i * V_i) * y} \quad (19)$$

Si la capacidad de la planta es el limitante, entonces:

$$g_c = \frac{c_i - a_i * A_i - b_i * B_i + u_i * U_i + v_i * V_i + \frac{f + d * NPV_i}{C}}{(S_i - r_i + u_i * U_i + v_i * V_i) * y} \quad (20)$$

Si la capacidad de la refinería es el limitante, entonces:

$$g_r = \frac{c_i - a_i * A_i - b_i * B_i + u_i * U_i + v_i * V_i}{\left(S_i - r_i + u_i * U_i + v_i * V_i - \frac{f + d * NPV_i}{R}\right) * y} \quad (21)$$

Donde NPV_i es definido por la siguiente ecuación:

$$NPV_i = \frac{v_i * ((1 + d)^N - 1)}{d * (1 + d)^N} \quad (22)$$

Para fines de esta investigación no se hará uso de la variable NPV, por lo que se elimina dicha variable de todas las ecuaciones, sin embargo, se precisa explicarla y detallarla en el modelo para una mejor comprensión.

Además, se definen los casos cuando dos componentes están simultáneamente en su máxima capacidad. La primera ley de equilibrio g_{mc} proviene de la siguiente ecuación:

$$\frac{Qm_i}{M} = \frac{Qc_i}{C} \quad (23)$$

La ley de corte óptima que satisface la mina y planta a la vez es (G_{mc}):

$$G_{mc} = g_m \quad \text{si, } g_{mc} \leq g_m$$

$$G_{mc} = g_c \quad \text{si, } g_{mc} \geq g_c$$

$$G_{mc} = g_{mc} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{mc} = \text{Mediana}(g_{mc}, g_c, g_m)$.

La segunda ley de equilibrio (g_{rc}) viene de la ecuación:

$$\frac{Qc_i}{C} = \frac{Qr_i}{R} \quad (24)$$

La ley de corte óptima que satisface la planta y refinería a la vez es (G_{mc}):

$$G_{rc} = g_r \quad \text{si, } g_{rc} \leq g_r$$

$$G_{rc} = g_c \quad \text{si, } g_{rc} \geq g_c$$

$$G_{rc} = g_{rc} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{rc} = \text{Mediana}(g_{rc}, g_c, g_r)$.

Por último, la tercera ley de equilibrio (g_{mr}) proviene de la ecuación:

$$\frac{Qm_i}{M} = \frac{Qr_i}{R} \quad (25)$$

La ley de corte óptima que satisface a la mina y la refinería a la vez es (G_{mr}):

$$G_{mr} = g_m \quad \text{si, } g_{mr} \leq g_m$$

$$G_{mr} = g_r \quad \text{si, } g_{mr} \geq g_r$$

$$G_{mr} = g_{mr} \quad \text{otro caso}$$

O también $G_{mr} = \text{Mediana}(g_{mr}, g_m, g_r)$.

Por último, la ley de corte óptima general (G_{opt}) es:

$$G_{opt} = \text{Mediana}(G_{mr}, G_{rc}, G_{mc}).$$

Modelo 3: En una forma muy similar al modelo anterior, Narrei y Osanloo en 2015 presentaron su modelo de Lane con la inclusión de costos asociados a la gestión y recuperación de botaderos de desechos, tranques de relaves y del pit. Además, incluye los posibles ingresos de la recuperación de este [18].

Se define la ecuación para maximización del VAN de la siguiente manera:

$$\text{Max NPV} = \left(\sum_{i=0}^n \frac{NCF_i}{(1+d)^i} \right) \quad (26)$$

$$NCF_i = (S_i - r_i) * Qr_i - m_i * Qm_i - a_i * A_i * (Qm_i - Qc_i) - b_i * B_i * (Qm_i - Qc_i) - c_i * Qc_i - u_i * U_i * (Qc_i - Qr_i) - v_i * V_i * (Qc_i - Qr_i) - (f + d * NPV_i) * T \quad (27)$$

Esta ecuación del algoritmo de Lane puede ampliarse aún más para considerar el valor revelado de los materiales de desecho y la recuperación del uso de la tierra minada.

$$NCF_i = (S_i - r_i) * Qr_i - m_i * Qm_i - a_i * A_i * (Qm_i - Qc_i) - b_i * B_i * (Qm_i - Qc_i) + Iw_i * A_i * (Qm_i - Qc_i) + Iw_i * B_i * (Qm_i - Qc_i) + Iu_i * C_i * (Qm_i - Qc_i) - c_i * Qc_i - u_i * U_i * (Qc_i - Qr_i) - v_i * V_i * (Qc_i - Qr_i) + Rt_i * U_i * (Qc_i - Qr_i) + Rt_i * V_i * (Qc_i - Qr_i) + Ru_i W_i (Qc_i - Qr_i) - Cp_i Qr_i + Rp_i Qr_i - (f + d * NPV_i) * T \quad (28)$$

La notación de estas ecuaciones se define en la tabla 5.

Tabla 5 Notación del modelo, modificado de [18]

Notación	Definición	Unidad
I	Indicador de año	-
NPV	Valor actual neto	\$
NCF	Flujo de efectivo neto	\$
N	Vida útil de la mina	años
T	Tiempo necesario para trabajar a través de una unidad de material mineralizado	años
M	Capacidad de la mina	Ton/año
C	Capacidad de la planta	Ton/año
R	Capacidad de la refinería	Ton/año
Qm	Cantidad de material extraído	Ton/año
Qc	Cantidad de material procesado	Ton/año
Qr	Cantidad de material refinado	Ton/año
G	Ley media	-
Y	Recuperación metalúrgica	%
D	Tasa de descuento	%
A	Material NAF extraído	-
B	Material PAF extraído	-
C	Material de desecho reutilizado	-

U	Relave NAF	-
V	Relave PAF	-
W	Relave reutilizado	-
S	Precio metal	\$/lb producto
I_w	Ingresos por recuperación de desecho	\$/lb desecho
I_u	Ingresos por revalorización de desechos	\$/lb desecho
R_t	Ganancia por recuperación de tranques de relaves	\$/ton relave
R_p	Ganancia por recuperación del tajo	\$/lb producto
M	Costo minado	\$/ton material
R	Costo refinería	\$/lb producto
C_p	Costo de recuperación del pit	\$/lb producto
A	Costo operativo de eliminación desechos NAF	\$/ton desecho
B	Costo operativo de eliminación desechos PAF	\$/ton desecho
U	Costo operativo eliminación relaves NAF	\$/ton relave
V	Costo operativo eliminación relaves PAF	\$/ton relave
F	Costos fijos	\$/año

Siguiendo las siguientes restricciones:

$$Q_{m_i} \leq M \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Q_{c_i} \leq C \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Q_{r_i} \leq R \text{ para } i = 1, \dots, N$$

$$Q_{r_i} = g * y * Q_{c_i}$$

$$A_i + B_i = 1 \text{ y } U_i + V_i = 1$$

Definiendo las leyes de corte en base a la capacidad limitante de la siguiente manera:

Si la mina es la capacidad limitante:

$$g_m = \frac{(c_i + u_i * U_i + v_i * V_i + Iw_i * A_i + Iw_i * B_i + Iu_i * C_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - a_i * A_i - b_i * B_i)}{(S_i + u_i * U_i + v_i * V_i - r_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - Cp_i + Rp_i) * y} \quad (29)$$

Si la capacidad de la planta es el factor limitante, entonces la ley de corte es:

g_c

$$= \frac{(c_i + u_i * U_i + v_i * V_i + Iw_i * A_i + Iw_i * B_i + Iu_i * C_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - a_i * A_i - b_i * B_i + \frac{f + d * NPV_i}{C})}{(S_i + u_i * U_i + v_i * V_i - r_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - Cp_i + Rp_i) * y} \quad (30)$$

Si la capacidad de la refinaría es el limitante, entonces la ley de corte viene dada por:

$$g_r = \frac{(c_i + u_i * U_i + v_i * V_i + Iw_i * A_i + Iw_i * B_i + Iu_i * C_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - a_i * A_i - b_i * B_i)}{(S_i + u_i * U_i + v_i * V_i - r_i - Rt_i * U_i - Rt_i * V_i - Ru_i W_i - Cp_i + Rp_i - \frac{f + d * NPV_i}{C}) * y} \quad (31)$$

El VAN (NPV) viene dado por la ecuación:

$$NPV_i = \frac{NCF_i * ((1 + d)^N - 1)}{d * (1 + d)^N} \quad (32)$$

Además, se cumple con la siguiente relación:

$$g_m \leq g_r \leq g_c$$

Como la ley de corte óptima no puede ser menor a g_m , ya que esta es igual a la ley de corte de equilibrio, entonces esta ley que maximiza la función objetivo se encuentra entre g_m y g_c . Esto se representa de la siguiente forma:

$$g_m \leq G_{opt} \leq g_c$$

Si dos capacidades están simultáneamente a plena capacidad, se calculan tres leyes de corte denominadas leyes de equilibrio. La primera ley de equilibrio es la ley g_{mc} , la cual proviene de la siguiente ecuación:

$$\frac{Qm_i}{M} = \frac{Qc_i}{C} \quad (33)$$

La ley de corte óptima que satisface la mina y planta a la vez es (G_{mc}), la cual toma valores correspondientes a los siguientes casos:

$$G_{mc} = g_m \quad \text{si, } g_{mc} \leq g_m$$

$$G_{mc} = g_c \quad \text{si, } g_{mc} \geq g_c$$

$G_{mc} = g_{mc}$ otro caso

O también $G_{mc} = \text{Mediana}(g_{mc}, g_c, g_m)$.

La segunda ley de equilibrio (g_{rc}) viene de la ecuación:

$$\frac{Qc_i}{C} = \frac{Qr_i}{R} \quad (34)$$

La ley de corte óptima que satisface la planta y refinería a la vez es (G_{mc}), la cual toma valores correspondientes a los siguientes casos:

$G_{rc} = g_r$ si, $g_{rc} \leq g_r$

$G_{rc} = g_c$ si, $g_{rc} \geq g_c$

$G_{rc} = g_{rc}$ otro caso

O también $G_{rc} = \text{Mediana}(g_{rc}, g_c, g_r)$.

Por último, la tercera ley de equilibrio (g_{mr}) proviene de la ecuación:

$$\frac{Qm_i}{M} = \frac{Qr_i}{R} \quad (35)$$

La ley de corte óptima que satisface a la mina y la refinería a la vez es (G_{mr}), la cual toma valores correspondientes a los siguientes casos:

$G_{mr} = g_m$ si, $g_{mr} \leq g_m$

$G_{mr} = g_r$ si, $g_{mr} \geq g_r$

$G_{mr} = g_{mr}$ otro caso

O también $G_{mr} = \text{Mediana}(g_{mr}, g_m, g_r)$.

Finalmente, la ley de corte óptima general que maximiza la función objetivo (G_{opt}) es:

$G_{opt} = \text{Mediana}(G_{mr}, G_{rc}, G_{mc})$.

3. DESARROLLO

3.1 Ley de corte de acidez

Con el objetivo de clasificar los minerales estériles en función de su capacidad de generación de ácido o la falta de esta, se establece la ley de corte de acidez. Si un bloque tiene una ley de estéril inferior a la ley de corte de acidez, se clasifica como material NAF; en cambio, si la ley supera dicho valor, se clasifica como PAF.

Para llevar a cabo esta clasificación, se basa en un estudio geoquímico realizado en las operaciones de la mina Cade Valley en Australia [19]. En este estudio, se elaboró un modelo de bloques de generación de ácido en relación con la ley de pirita. Con respecto al estudio citado, a partir de una caracterización de material y ensayos estáticos y dinámicos se determinó que es necesario una ley superior al 0,35 [%] de pirita se genera ácido.

En conclusión, para mitigar el riesgo de generar drenaje ácido de mina, se recomienda establecer una ley de corte de acidez del 0,3 [%] de pirita, con un margen de seguridad de 0,05[%] más bajo que el límite definido en el estudio mencionado anteriormente. Esta medida tiene como objetivo garantizar la ausencia de DAM en las operaciones mineras.

Dicha clasificación se presenta brevemente detallada en la tabla 6.

Tabla 6 Clasificación de material estéril en base a ley de corte de acidez

Clasificación de material estéril	Ley de corte de acidez
NAF	< 0,3
PAF	≥ 0,3

3.2 Revisión del modelo de bloques

Para llevar a cabo la revisión del modelo de bloques es necesario trabajar sobre la base de datos proporcionada, que consiste en un análisis de sondajes de una mina de cobre con baja ley. Para este estudio, se ha considerado un corte 2D del modelo, que comprende un total de 900 sondajes con $YC=3.300.367,5$. Los bloques presentes en esta sección tienen un tamaño de 15*15*15 metros, y se ha asumido una densidad de material de 2,7 toneladas por metro cúbico para todos los bloques. En esta sección, los bloques de estéril tienen una ley de pirita, mientras que los bloques de mineral se

caracterizan por una ley de cobre. La tabla 7 presenta las variables de interés para la investigación junto con su respectivo significado y tipo de variable.

Tabla 7 Variables presentes en el modelo de bloques

Nomenclatura	Significado	Tipo de variable
Xc	Coordenada céntrica del bloque en el eje x	Numérica
Yc	Coordenada céntrica del bloque en el eje y	Numérica
Zc	Coordenada céntrica del bloque en el eje z	Numérica
Xinc	Tamaño de bloque en el eje x	Numérica
Yinc	Tamaño de bloque en el eje y	Numérica
Zinc	Tamaño de bloque en el eje z	Numérica
Zone	Tipo de mineral	Catórica
Ley_pyr	Ley de piritita	Numérica
Cue	Ley de cobre	Numérica
Ton	Tonelaje del bloque	Numérica

Se llevará a cabo un análisis estadístico descriptivo del modelo de bloques utilizando la plataforma AIM Artificial Intelligence [21]. Además, se presentará un histograma de las variables de la ley de cobre para representar la distribución de frecuencias e identificar la presencia de datos atípicos.

Tabla 8 Análisis descriptivo ley de cobre

Análisis descriptivo	
CUE	
Numero de datos	16.348
Media	0,234
Desviación estándar	0,081
Varianza	0,006561
Rango	0,541
Mínimo	0,046
Máximo	0,587
Oblicuidad	0,262
Curtosis	3,177
Rango Inter cuartil	0,106
Cuartil 25%	0,179
Cuartil 50%	0,235
Cuartil 75%	0,285

Para un análisis más representativo de la ley de cobre, se procederá a eliminar los bloques con ZONE=0, ya que estos bloques son de estéril y no aportan información relevante para la ley de cobre. La Figura 5 mostrará el histograma resultante después de esta eliminación.

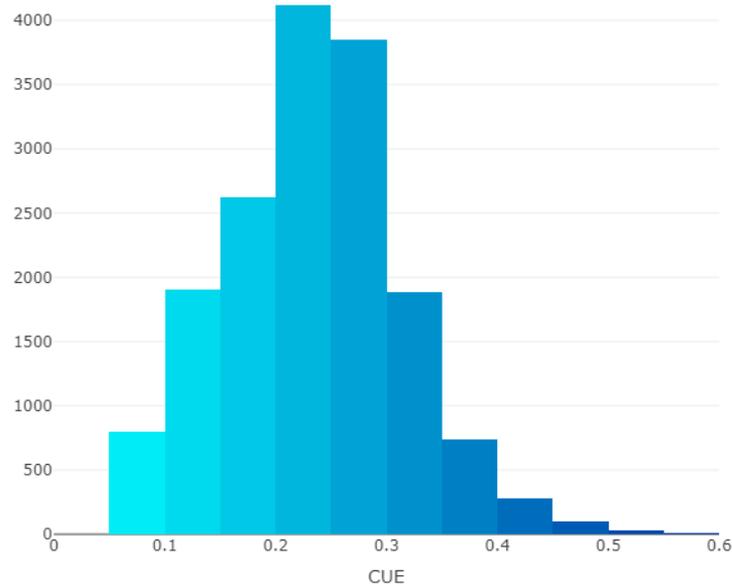


Figura 5: Histograma de distribución de ley de cobre

3.3 Calculo ley de corte

3.3.1 Curva Tonelaje-Ley

La relación entre el tonelaje extraído y la ley de un depósito minero desempeña un papel crucial en la planificación y evaluación de operaciones mineras. La curva tonelaje versus ley es fundamental en la industria minera, ya que traza la variación de la ley de un mineral en función de la cantidad extraída.

Bajo este contexto, se presenta a continuación en la Figura 6 la curva tonelaje vs ley de la sección estudiada en el presente informe. Se observa que esta reserva es de baja ley, y hay muy poco

tonelaje de material con una ley mayor a 0,3. Además, en promedio, la ley presente es de 0,25. Cabe mencionar que el perfil de estudio abarca un tonelaje total de 3.000.000 de material.

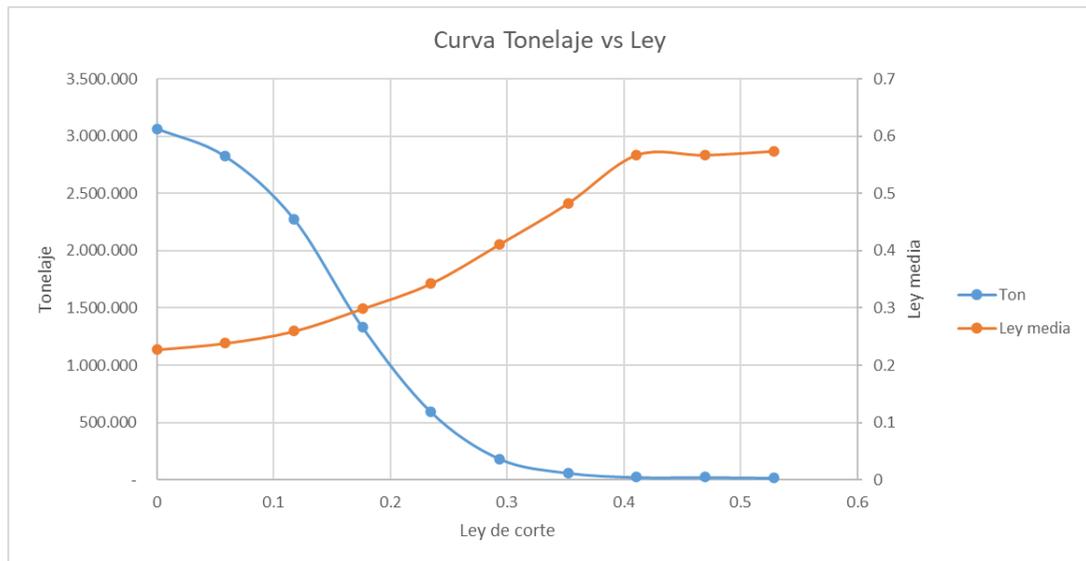


Figura 6: Curva tonelaje vs ley sección de interés 2D

3.3.2 Parámetros económicos

El cálculo de la ley de corte se puede realizar mediante varios métodos; en el presente informe, se desarrollarán estos cálculos en base al modelo de Lane [15]. Para llevar a cabo la estimación de dicha ley, es esencial considerar una serie de parámetros económicos, entre los cuales se incluyen el precio de venta del mineral, el costo de refinar el mineral, el costo de la extracción de bloques de mineral, el costo de procesamiento del mineral, el costo anual fijo, la tasa de recuperación y la tasa de descuento. Todos estos valores se detallan en la tabla 9 para facilitar su referencia.

Tabla 9 Parámetros económicos de la sección de interés

Notación	Parámetro	Valor	unidad
p	Precio	3,78	\$/lb
r	Costo refinación	0,25	\$/lb
m	Costo Mina	2	\$/t
c	Costo Planta	9	\$/t mineral
f	Costo Anual Fijo	300.000.000	\$/año
y	Recuperación	85	%
d	Tasa de descuento	7	%

3.3.3 Capacidades

Las capacidades juegan un papel fundamental en el modelo de Lane, y al no ser una información entregada por la mina en la que se realiza el estudio, es necesario estimarlas. Estas serán calculadas en base al ritmo de producción de la sección. Para esto, Taylor [20] estudió una variedad de proyectos mineros (en operación y en planificación) y descubrió que las tasas de producción parecían proporcionales a la potencia de 3/4 del tonelaje de mineral en lugar de la potencia de 2/3 y que la vida útil de la mina era proporcional a la raíz cuadrada del tonelaje, lo cual se resume en la ecuación a continuación.

$$\text{Vida de la mina} = 0.2 * \sqrt[4]{\text{Tonelaje de mineral}} \quad (36)$$

Luego la ecuación para determinar la tasa de producción de la sección es:

$$\text{Tasa de producción} \left(\frac{\text{mt}}{\text{día}} \right) = \frac{\text{Tonelaje}}{\text{Vida de la mina} * \text{Días operativos}} \quad (37)$$

Asumiendo que la sección opera durante 350 días al año, la ecuación se traduce a:

$$\text{Tasa de producción} \left(\frac{\text{mt}}{\text{año}} \right) = 0.0143 * \text{Tonelaje}^{0.75} \quad (38)$$

Aplicando dichas ecuaciones, se obtiene como resultado una productividad de 516,249.5 toneladas por año; por lo tanto, se asume una capacidad mina de 600,000 toneladas al año. Luego, para obtener la capacidad de la planta, asumiendo para efectos del cálculo una relación estéril-mineral de 2 es a 1, entonces la capacidad de la concentradora será la mitad de la capacidad total de la mina. Por último, la capacidad de la refinería se calcula en base a la capacidad de la planta y la recuperación de la mina, obteniendo de esta forma las siguientes capacidades.

Tabla 10 Capacidades de la sección de interés

M	Capacidad Mina	600.000	t/año
C	Capacidad Planta	300.000	t/año
R	Capacidad Refinería	255.000	t/año

3.3.4 Leyes de corte económicas

Una vez obtenidos los parámetros, se procede a calcular las leyes de corte económicas, las cuales corresponden a la ley de corte del mineral cuando una de las tres capacidades se encuentra

saturada, es decir, cuando su capacidad es la máxima permitida. En donde g_m es la ley cuando la capacidad mina está saturada, g_c cuando la capacidad planta lo está y, por último, g_r que es cuando la capacidad de la refinería no puede recibir más material. Para el cálculo de estas leyes se aplican las ecuaciones 9,10 y 11 descritas previamente en el capítulo 2.5 junto con los parámetros descritos en la tabla 9. En la tabla 11 se visualizan estos resultados.

Tabla 11 Leyes de corte económicas para cada capacidad limitante

Leyes de corte económicas	
g_m	0,136%
g_c	0,151%
g_r	0,160%

3.3.5 Leyes de corte de equilibrio y ley óptima

Posteriormente al cálculo de las leyes de corte económicas, se procede a calcular las leyes de corte de equilibrio, las cuales se definen cuando dos capacidades se encuentran en equilibrio, es decir, trabajando a su plena capacidad. La primera ley de corte de equilibrio es g_{mc} , la cual representa la ley de corte óptima que satisface a la mina y planta. La segunda ley es g_{rc} que satisface a la refinería y planta, y, por último, también se tiene la ley g_{mr} , que satisface a la mina y refinería a la vez.

El proceso para calcular estas leyes de equilibrio consiste en representar gráficamente las relaciones de las cantidades de material minado (Q_m) material enviado a planta (Q_c) y material enviado a refinería (Q_r), versus la ley de corte. Posterior a ello, en base a las razones de las capacidades M/C, M/R o C/R como corresponda, se ubica el valor de dicha razón en el eje vertical (y), se traza una línea hasta la curva y luego se proyecta hasta el eje horizontal (x), el cual indicaría cual es el valor de la ley de g_{mc} , g_{mr} , y g_{rc} en cada caso. A continuación, en la Figura 7 se resume el paso a paso.

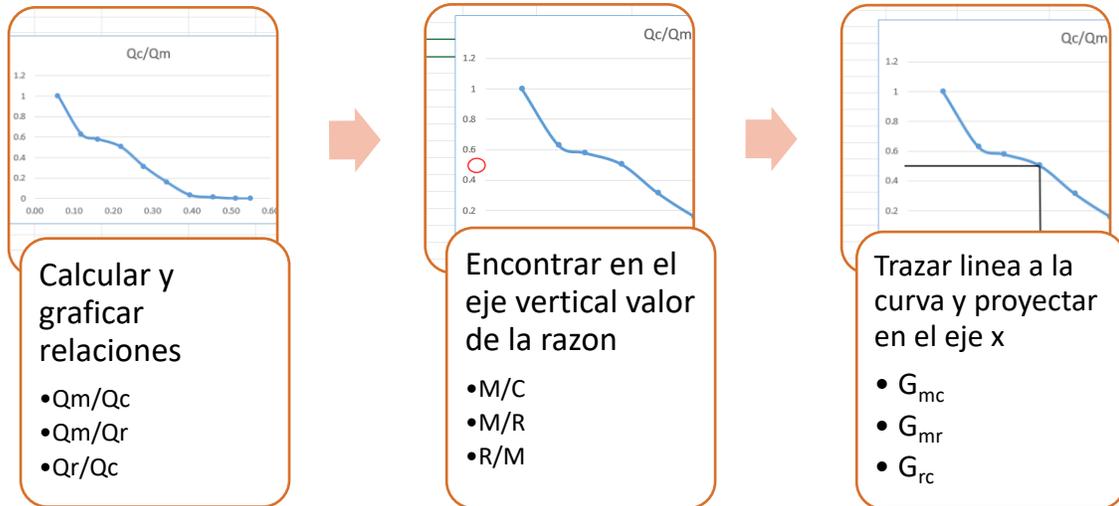


Figura 7: Resumen proceso de cálculo de leyes de corte de equilibrio

Después de haber obtenido g_{mc} , g_{mr} y g_{rc} , se debe calcular G_{mc} , G_{mr} y G_{rc} , las cuales son estimadas en base a la mediana de las leyes de corte económicas de las dos etapas saturadas y estas nuevas leyes de equilibrio. En la tabla 12 se muestran los resultados de las leyes de corte anteriormente mencionadas.

Tabla 12 Leyes de corte de equilibrio

G_{mc}	0,15%
G_{mr}	0,16%
G_{rc}	0,16%

Finalmente, la ley de corte óptima de la sección corresponde al porcentaje de mineral mínimo que cumple con las tres restricciones a la vez, calculado en base a la mediana de G_{mc} , G_{mr} y G_{rc} , obteniendo de esta forma un valor de 0,16. Otra forma de determinar dicha ley óptima es con el gráfico de beneficios versus la ley de corte, en la Figura 8 se representa dicho gráfico junto con la intersección que corresponde a G_{opt} .

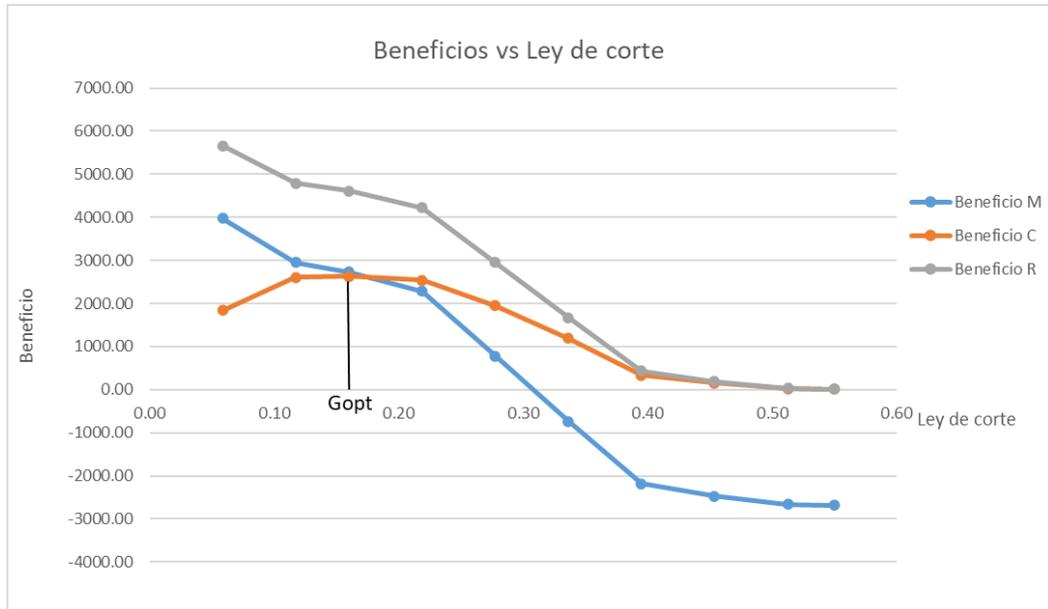


Figura 8: Gráfico beneficios vs ley de corte y ley de corte óptima

3.3.6 VAN del proyecto

El Valor Actual Neto (VAN) del proyecto está definido por la ecuación 6 del apartado de VAN en antecedentes. Posterior a la obtención de la ley de corte óptima (0,16), es posible saber con exactitud los valores de cantidad de material minado (Q_m), cantidad de mineral procesado (Q_c) y cantidad de mineral refinado (Q_r) por año. Con esto, se calcula el beneficio por año, definido gracias a la ecuación presentada en el apartado de Lane.

Este cálculo arroja un valor de 304 MUSD por año. Reemplazando este valor en la ecuación 6, se obtiene el VAN de la sección estudiada en el proyecto, dando como resultado 1.978 MUSD.

3.4 Calculo ley de corte con Modelo 1

El Modelo 1, definido previamente en el informe como el creado por Gholamnejad, tiene como finalidad incorporar un nuevo costo al modelo de Lane convencional asociado a la rehabilitación del drenaje ácido de mina, denominado “h”.

Los parámetros económicos de la sección estudiada son los presentados en el apartado 3.3.2, con la inclusión del costo por rehabilitación de drenaje ácido “h”. De igual forma, las capacidades de la mina, planta y refinería se mantienen constantes a lo largo de todo el proyecto y en cada uno de los modelos analizados.

Este proyecto está limitado al conocimiento del costo de rehabilitación de drenaje ácido, ya que la mina real del modelo de bloques analizado no dispone de dicho valor. Por lo tanto, para efectos de la investigación e interpretación del Modelo 1, se realizará un análisis de sensibilidad con dicha variable. En este análisis, “h” tomará valores desde 0 hasta 4,5 con un incremento de 0,5.

3.4.1 Leyes de corte económicas

El cálculo de leyes de corte económicas en el Modelo 1 es similar al modelo de Lane tradicional. Sirve para conocer las leyes cuando cada una de las capacidades de la mina está trabajando saturada, con una sola adición que es h. En base a las ecuaciones 13, 14 y 15, se estiman las leyes g_m , g_c y g_r para cada uno de los distintos valores de h previamente definidos. En la tabla 13 se aprecian los resultados de dichos cálculos.

Tabla 13 Leyes de corte económicas para cada valor de h

Valor “h” (\$/ton)	g_m	g_c	g_r
0	0,136%	0,151%	0,160%
0.5	0,128%	0,144%	0,151%
1	0,121%	0,136%	0,142%
1,5	0,113%	0,128%	0,134%
2	0,106%	0,121%	0,125%
2,5	0,098%	0,113%	0,116%
3	0,091%	0,106%	0,107%
3,5	0,083%	0,098%	0,098%
4	0,076%	0,091%	0,089%
4,5	0,068%	0,083%	0,080%

Es evidente observar una disminución proporcional de la ley de corte al aumentar el costo de rehabilitación de drenaje ácido. Esto era de esperar, ya que el costo “h” en las ecuaciones 13, 14 y 15 se resta en el numerador sin tener ninguna influencia en el denominador.

3.4.2 Cálculo de leyes de corte de equilibrio y ley óptima

Las leyes de corte de equilibrio no se ven afectadas por ningún cambio en la ecuación en este modelo. Esto implica que la metodología a seguir es de igual manera que en el cálculo de la ley de corte de Lane. Por lo tanto, se sigue el paso a paso de la Figura 7, incluyendo el cálculo de la mediana de las leyes económicas involucradas junto con la ley de equilibrio. Lo cual nos da como resultados para cada valor de “h” las siguientes leyes.

Tabla 14 Leyes de corte de equilibrio para cada valor de h

Valor “h” (\$/ton)	G _{mc}	G _{mr}	G _{rc}
0	0,151%	0,136%	0,160%
0,5	0,144%	0,128%	0,151%
1	0,136%	0,121%	0,142%
1,5	0,128%	0,113%	0,134%
2	0,121%	0,106%	0,125%
2,5	0,113%	0,098%	0,116%
3	0,106%	0,091%	0,107%
3,5	0,098%	0,083%	0,098%
4	0,091%	0,076%	0,091%
4,5	0,083%	0,068%	0,083%

De igual forma que las leyes de corte económicas, la ley tiende a disminuir a medida que se aumenta el costo de rehabilitación de drenaje ácido de mina.

Por último, la ley de corte óptima debe ser estimada para cada uno de los valores de “h” presentados anteriormente, y con la utilización de la mediana se encuentra dicha ley máxima que satisface todas las capacidades.

Tabla 15 Ley de corte óptima para cada valor de h

Valor de "h" (\$/ton)	G _{opt}
0	0,151%
0,5	0,144%
1	0,136%
1,5	0,128%
2	0,121%
2,5	0,113%
3	0,106%
3,5	0,098%
4	0,091%
4,5	0,083%

3.4.3 VAN del proyecto

De manera similar a todos los parámetros calculados anteriormente, el Valor Actual Neto (VAN) presentará un valor distinto para cada costo de rehabilitación de drenaje ácido de mina analizado.

Se procede a calcular el beneficio considerando las cantidades de minado, procesado y refinado por año, según la ecuación 15 previamente exhibida en los antecedentes, que se presenta a continuación:

Luego de calcular el beneficio anual de la sección, se procede a determinar el Valor Actual Neto (VAN) mediante la ecuación previamente expuesta en los antecedentes. Los resultados de este procedimiento se presentarán detalladamente en secciones posteriores de este informe.

3.5 Cálculo de ley de corte con Modelo 2

El segundo modelo por analizar en este proyecto es el descrito por Rashidinejad, el cual incorpora al modelo de Lane ya conocido un costo asociado a la eliminación de desechos y relaves de materiales NAF y PAF.

La distinción entre los materiales que pueden generar ácido y aquellos que no lo pueden hacer se establecerá conforme a la ley de corte de acidez previamente calculada y aplicada a la columna de ley de piritita presente en la sección estudiada.

Dado que la mina de este estudio no presenta tranques de relaves, se realizará un cálculo de ley de corte sin tranques de relaves y otro con los tranques, realizando una consideración apropiada para la estimación de estos.

La cantidad de material enviado a relaves será estimada como la diferencia entre el material enviado a la planta concentradora y el material producto de la refinación. Esto se debe a que los relaves suelen ser los desechos originarios de las plantas concentradoras en forma de tierra molida y agua (pulpas).

Además, en este modelo se precisa conocer los costos asociados a la eliminación de los desechos NAF y PAF, así como la eliminación de los relaves NAF y PAF. Para esto, en base a Rashidinejad y su estudio en Canadá de 1995, se determinó que los costos de desechos de relaves y botaderos PAF son de 0,81 \$/ton y 0,54 \$/ton, respectivamente. Estas cifras fueron actualizadas a dólar actual. A continuación, en la tabla 16 es posible ver dichos valores utilizados.

Tabla 16 Costos asociados a la eliminación de desechos y relaves PAF y NAF

a	Costo eliminación desechos NAF	1,5	\$/ton	u	Costo eliminación de relaves NAF	1,5	\$/ton
b	Costo eliminación desechos PAF	2,504	\$/ton	v	Costo eliminación de relaves PAF	3,006	\$/ton

3.5.1 Leyes de corte económicas

La estimación de las leyes de corte económicas para el modelo 2 está dada por las ecuaciones 19,20 y 21 respectivamente.

Estas ecuaciones son claramente más extensas que las originales del modelo de Lane, abarcando una mayor cantidad de variables, que están asociados a la eliminación de relaves y desechos PAF y NAF. Los valores para ambos casos se presentan en las tablas 17 y 18.

Tabla 17 Leyes de corte económicas modelo 2 sin relaves

Leyes de corte	
G_m	0,109%
G_c	0,125%
G_r	0,129%

Tabla 18 Leyes de corte económicas modelo 2 con relaves

Leyes de corte	
G_m	0,152%
G_c	0,167%
G_r	0,179%

3.5.2 Leyes de corte de equilibrio y ley óptima

Nuevamente, las leyes de corte de equilibrio no se ven afectadas por cambios en su metodología y ecuaciones de cálculo, por lo que se sigue el paso a paso de la Figura 7 con el cálculo de la mediana para obtener dichas leyes.

Tabla 19 Leyes de corte de equilibrio modelo 2 sin relaves

G_{mc}	0,12%
G_{mr}	0,13%
G_{rc}	0,13%

Tabla 20 Leyes de corte de equilibrio modelo 2 con relaves

G_{mc}	0,167%
G_{mr}	0,179%
G_{rc}	0,173%

Finalmente, la ley de corte óptima para cada uno de los casos se estima gracias a la mediana de las tres leyes de equilibrio calculadas anteriormente, los resultados detallados del procedimiento llevado a cabo se reservan para su exposición más adelante en el informe.

3.5.3 Cálculo del VAN

El beneficio definido por Rashidinejad está determinado por la ecuación 17 del apartado 2.5. En base a las cantidades de material minado, procesado y refinado, junto con la inclusión de material enviado a botadero y relave generador y no generador de ácido por año, se obtiene un profit de 336 MUSD por año para el caso sin relaves y de 309 MUSD por año para el caso con relaves.

Dichos beneficios tienen como consecuencia un VAN estimado de 2.187 MUSD para el caso 1 y de 2.013 MUSD para el caso 2.

3.6 Cálculo ley de corte con modelo 3

El tercer y último modelo examinado en esta investigación es el propuesto por Narrei [18], el cual guarda notables similitudes con el modelo de Rashidinejad. Ambos modelos incorporan costos relacionados con la gestión y recuperación de botaderos y tranques de relave. Sin embargo, se distinguen en la inclusión de posibles ingresos asociados al proceso de recuperación.

Para separar los materiales NAF y PAF en este modelo, se aplicará el criterio de la ley de corte de acidez definida anteriormente, tomando como referencia la ley de pirita presente en los bloques de la sección estudiada.

Aunque no se dispone de información sobre los ingresos asociados a la recuperación, para los fines de esta investigación se estimarán en función de un porcentaje del beneficio anual calculado previamente con el modelo de Lane original para la sección estudiada. Este valor calculado se distribuirá equitativamente entre las variables de ingresos consideradas para utilizar en las ecuaciones planteadas en el modelo 3, que son los ingresos por recuperación de desechos (I_w), ingresos por revalorización de desechos (I_u) y ganancia por recuperación de tranque de relaves (R_t).

Con el objetivo de analizar de manera más detallada el impacto en la ley de corte y el Valor Actual Neto (VAN) ante las variables mencionadas, se llevará a cabo el proceso completo para cuatro porcentajes diferentes del beneficio anual de la sección 2D analizada en este proyecto, variando entre un 5%, 10%, 15% y 20%.

3.6.1 Leyes de corte económicas

Para efectos de este modelo las leyes de corte económicas limitadas por las capacidades de mina, planta y refinería, son calculadas con las ecuaciones 29, 30 y 31 respectivamente, las cuales fueron explicadas y detalladas en el apartado 2.5.

Obteniendo así para cada uno de los porcentajes de ingresos las siguientes leyes de corte económicas.

Tabla 21 Valores leyes de corte económicas para cada % de ingresos considerado

% Ingresos	5%	10%	15%	20%
g_m	0,152%	0,152%	0,153%	0,153%
g_c	0,167%	0,168%	0,168%	0,168%
g_r	0,179%	0,180%	0,180%	0,180%

Se observa que las leyes a medida que se aumenta el porcentaje de ingresos tienden a aumentar de manera muy pequeña.

3.6.2 Leyes de corte de equilibrio y ley óptima

El cálculo de las leyes de equilibrio no sufre ningún cambio en su metodología por lo que se sigue el paso a paso de la Figura 7 presentada anteriormente, considerando la mediana de las leyes involucradas con el fin de obtener G_{mc} , G_{mr} y G_{rc} . Este proceso es replicado para cada uno de los diferentes porcentajes de ingresos considerados en el estudio, dichos resultados se visualizan en la tabla 22.

Tabla 22 Valores leyes de corte de equilibrio para cada porcentaje de ingresos considerado

% Ingresos	5%	10%	15%	20%
G_{mc}	0,167%	0,168%	0,168%	0,168%
G_{mr}	0,179%	0,180%	0,180%	0,180%
G_{rc}	0,173%	0,174%	0,174%	0,174%

La ley de corte óptima por su parte se estima gracias a la mediana de las leyes G_{mc} , G_{mr} y G_{rc} para cada uno de los cuatro casos estudiados en este modelo. Valores que serán presentados en resultados de este modelo.

3.6.3 Cálculo VAN

Finalmente, para calcular el Valor Actual Neto (VAN) de la sección estudiada, se requiere inicialmente el cálculo del beneficio anual. Según la ecuación 26 propuesta por Narrei y presentada en los antecedentes, se estima dicho valor. Posterior a la obtención de las leyes de corte óptima de cada caso, es posible determinar las cantidades de material minado, procesado y refinado anual para la sección de interés.

Con el valor del beneficio anual en mano, se procede a calcular el VAN de la sección mediante la ecuación 30. Los resultados del VAN se presentarán más adelante en el presente informe para cada caso de porcentaje de ingresos.

4. RESULTADOS

4.1 Resultados modelo 1 y análisis de sensibilidad

En esta sección, se presentarán los resultados del procedimiento llevado a cabo con el modelo presentado por Gholamnejad. En primer lugar, en la tabla 23 se presentan las leyes de corte óptimas para la sección correspondiente a cada uno de los valores de "h".

Tabla 23 Ley de corte óptima para cada valor de "h"

Valor h (\$/ton)	G _{opt}
0	0.151%
0,5	0.144%
1	0.136%
1,5	0.128%
2	0.121%
2,5	0.113%
3	0.106%
3,5	0.098%
4	0.091%
4,5	0.083%

Después de conocer la ley de corte óptima, se procede con el cálculo del Valor Actual Neto (VAN). Los resultados de dicho análisis se exhiben posteriormente en la tabla 24.

Tabla 24 VAN para cada valor de "h"

Valor de "h" (\$/ton)	Valor actual neto (MUSD)
0	1.978
0,5	2.636
1	2.711
1,5	2.741
2	2.783
2,5	2.819
3	2.867
3,5	2.867
4	2.944
4,5	4.924

Contrario a la mayoría de los resultados obtenidos en el modelo 1, el VAN del proyecto aumenta a medida que se incrementa el valor de "h". Esto se debe a que la ley de corte del modelo de bloques tiende a disminuir, lo cual se refleja en un aumento del mineral enviado a procesar.

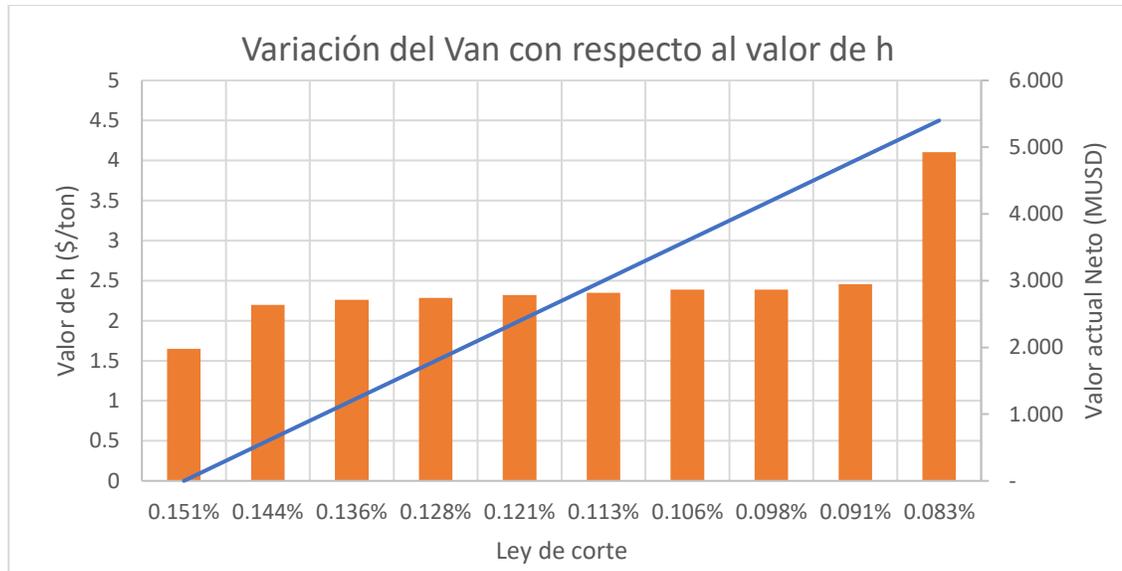


Figura 9: Variación del VAN con respecto al valor de "h" el cual representa su aumento con la línea azul presente

Con el propósito de evaluar el impacto en el Valor Actual Neto (VAN) y la ley de corte en el modelo 1, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad. Como se evidenció previamente, conforme aumenta el valor de "h", la ley de corte tiende a decrecer, implicando un incremento en la cantidad de materiales dirigidos al procesamiento. En consecuencia, el tratamiento de minerales con menor ley conlleva a una reducción en la eficiencia del proceso de la planta. En este contexto, el análisis de sensibilidad se llevará a cabo considerando que un incremento en el valor de "h" se asocia con una disminución en la recuperación de la planta. A continuación, se presenta la tabla que muestra los valores de la recuperación para cada valor de "h".

Tabla 25 Valores de recuperación asignados para cada valor de "h"

Valor de "h" (\$/ton)	Recuperación (%)
0	0.85
0,5	0.8
1	0.75
1,5	0.7
2	0.65
2,5	0.6
3	0.55
3,5	0.5
4	0.45
4,5	0.4

Una vez aplicado este cambio en la recuperación para cada valor de "h" correspondiente el valor actual neto del proyecto como consecuencia va disminuyendo considerablemente, lo cual se puede ver gráficamente en la Figura 10.



Tabla 26 Valor de VAN para cada valor de "h" en el análisis de sensibilidad

Valor de "h" (\$/ton)	VAN (MUSD)
0	1.978
0,5	2.293
1	2.025
1,5	1.758
2	1.518
2,5	1.222
3	883
3,5	883
4	360
4,5	99

Figura 10: Gráfico variación del VAN según valor de "h" el cual se representa su aumento con la línea azul y su ley de corte

A diferencia del caso sin la disminución en la recuperación proporcional al aumento del valor del costo de rehabilitación de drenaje ácido de mina, el VAN de la sección no sobrepasa los 2.500 MUSD y la ley de corte es incrementada. Esto se debe a que una recuperación menor en el proceso implica la necesidad de enviar un mineral con mayor ley para obtener ganancia.

4.2 Resultados modelo 2

En el caso del modelo 2, los resultados muestran en primer lugar el valor de la ley de corte óptima. Para el caso 1 (sin relaves), se obtuvo una ley de 0,13, considerablemente inferior a la ley de corte original del proyecto. Por otro lado, en el caso 2, la ley asciende a 0,17, representando un ligero aumento respecto a la ley de corte inicial del proyecto.

De igual forma, se presenta el Valor Actual Neto de la sección para cada uno de los 2 casos estudiados, donde consecuentemente se tiene un VAN estimado de 2.187 MUSD para el caso 1 y de 2.013 MUSD para el caso 2.

Se realizó un análisis de sensibilidad en el presente modelo aplicando una variación en el valor del costo de eliminación de relaves NAF y PAF, con el objetivo de analizar su influencia en la ley de corte y el VAN de la sección. Esto se llevó a cabo considerando un incremento de 0,5 \$/ton sobre el valor utilizado en el modelo, hasta alcanzar el valor de 3,5 \$/ton. De esta manera, se obtuvieron los siguientes valores de costo por eliminación de relaves NAF(u) y PAF(v) para cada caso.

Tabla 27 Valores "u" y "v" en el análisis de sensibilidad

Caso 1	u	2	\$/ton
	v (u+0,81*1,859)	3,506	\$/ton
Caso 2	u	2,5	\$/ton
	v (u+0,81*1,859)	4,006	\$/ton
Caso 3	u	3	\$/ton
	v (u+0,81*1,859)	4,506	\$/ton
Caso 4	u	3,5	\$/ton
	v (u+0,81*1,859)	4,006	\$/ton

En la tabla 28, se presentarán los resultados del análisis de sensibilidad realizado.

Tabla 28 Ley de corte y VAN análisis de sensibilidad

	Ley de corte	VAN (MUSD)
Caso 1	0,17%	2.013
Caso 2	0,18%	2.013
Caso 3	0,18%	2.012
Caso 4	0,20%	1.238

Se observa que, a medida que los costos aumentan, la ley de corte sigue la tendencia de incrementarse, mientras que el VAN disminuye. Este fenómeno se debe a que, con costos más elevados, se requiere mineral de una ley superior para que el proceso de procesamiento y refinamiento sea económicamente viable y cubra sus propios costos.

4.3 Resultados modelo 3

En el modelo 3, por su parte, se presentan resultados correspondientes a cada porcentaje de ingresos considerado en el cálculo de la ley de corte. Es por esta razón que proporciona un valor óptimo de ley de corte para cada uno de ellos, los cuales se detallan en la tabla 28.

Tabla 29 Ley de corte óptima para cada porcentaje de ingresos

% Ingresos	G_{opt}
5%	0,173%
10%	0,174%
15%	0,174%
20%	0,174%

Estas leyes no sufren un cambio significativo a medida que se aumenta el porcentaje de ingresos considerado.

El Valor Actual Neto (VAN) de la sección para cada caso se muestra en la tabla 29.

Tabla 30 Valor de VAN para cada caso

% Ingresos	VAN (MUSD)
5%	2.043
10%	2.072
15%	2.101
20%	2.131

En la Figura 11 se resumen todos los resultados obtenidos en el modelo 3. En ella, se observa cómo el Valor Actual Neto (VAN) experimenta un aumento significativo a medida que aumentan los ingresos. Es notable destacar que este incremento no se traduce en un aumento de la ley de corte, sugiriendo que el factor impulsor no depende de la ley de corte, sino que es provocado únicamente por el impacto de los ingresos.

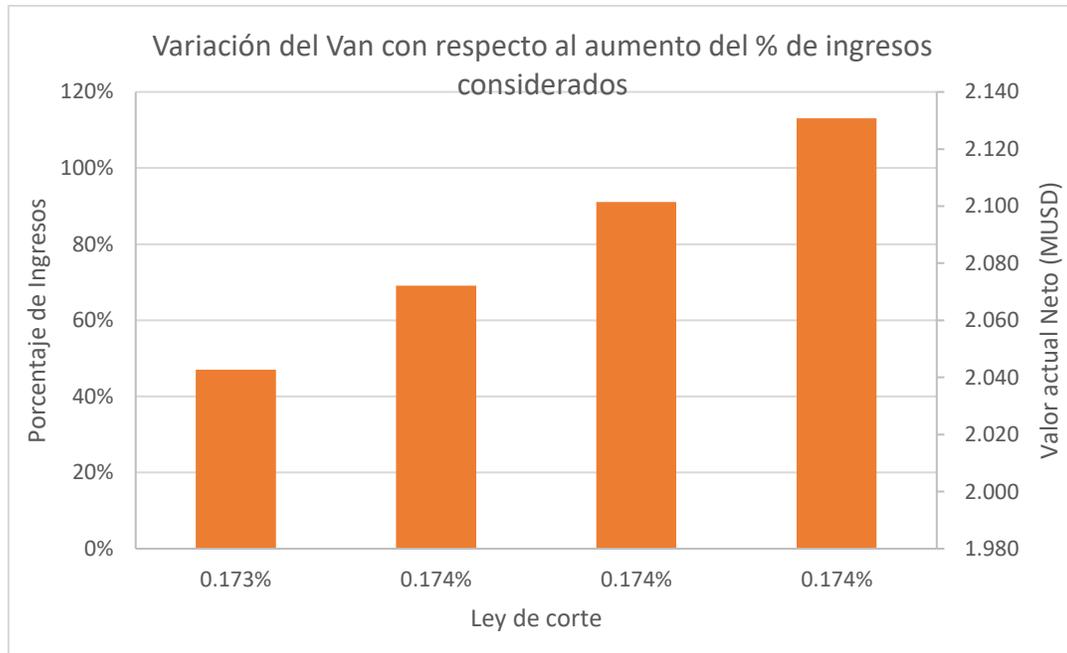


Figura 11: Variación del VAN para cada caso estudiado en el modelo 3

4.4 Comparación de los 3 modelos

Luego de estimar la ley de corte y el VAN para cada uno de los modelos, se procede al desarrollo de una comparación entre todos. En primer lugar, se presenta una tabla resumen con los resultados de la ley de corte óptima y VAN correspondientes a los modelos, considerando el promedio para aquellos casos donde se aplicaron diferentes parámetros.

Tabla 31 Resumen todos los resultados obtenidos

Modelo	Ley de corte	VAN(MUSD)
Lane	0,160%	1.978
Modelo 1	0,117%	2.927
Modelo 2	0,173%	2.013
Modelo 3	0, 174%	2.087

Se observa un aumento en la ley de corte a medida que se incorporan modelos que consideran una mayor cantidad de costos en el cálculo. Este fenómeno se debe a la necesidad de que cada bloque pague un costo considerable al ser procesado y refinado.

El Valor Actual Neto (VAN) muestra un incremento en comparación con el cálculo realizado por Lane. Sin embargo, este aumento experimenta variaciones debido a un cambio en la forma de calcular el beneficio anual del proyecto. Aunque en la mayoría de los modelos el VAN no varía tanto, Gholamnejad es la excepción, ya que la disminución de la ley de corte para este modelo conlleva un aumento considerable en el valor actual neto. Esta alteración se origina porque Gholamnejad no introdujo cambios en la ecuación de beneficio, sino que únicamente intervino en las ecuaciones de las leyes de corte económicas.

Rashidinejad y Narrei son modelos muy similares, distinguidos únicamente por la inclusión de posibles ingresos por recuperación considerados en Narrei. Debido a esta similitud, es imprescindible realizar una comparación.

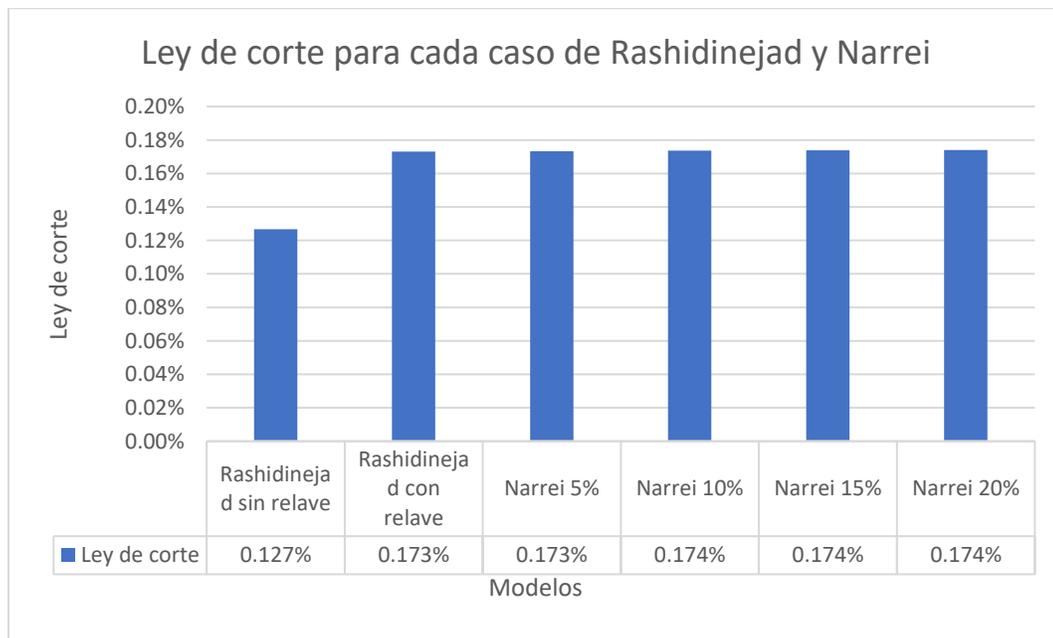


Figura 12: Ley de corte versus modelos de Rashidinejad y Narrei

En el caso de la ley de corte, como se puede apreciar, se mantiene constante oscilando entre valores de 0,17, con la única excepción en el modelo de Rashidinejad sin relave, donde la ley de corte

disminuye considerablemente hasta 0,127. Esto se debe a que, al eliminar la variable de relaves en este caso, se aleja de la realidad planteada por el modelo, disminuyendo considerablemente los costos asociados a la sección, lo que provoca la disminución de la ley de corte.

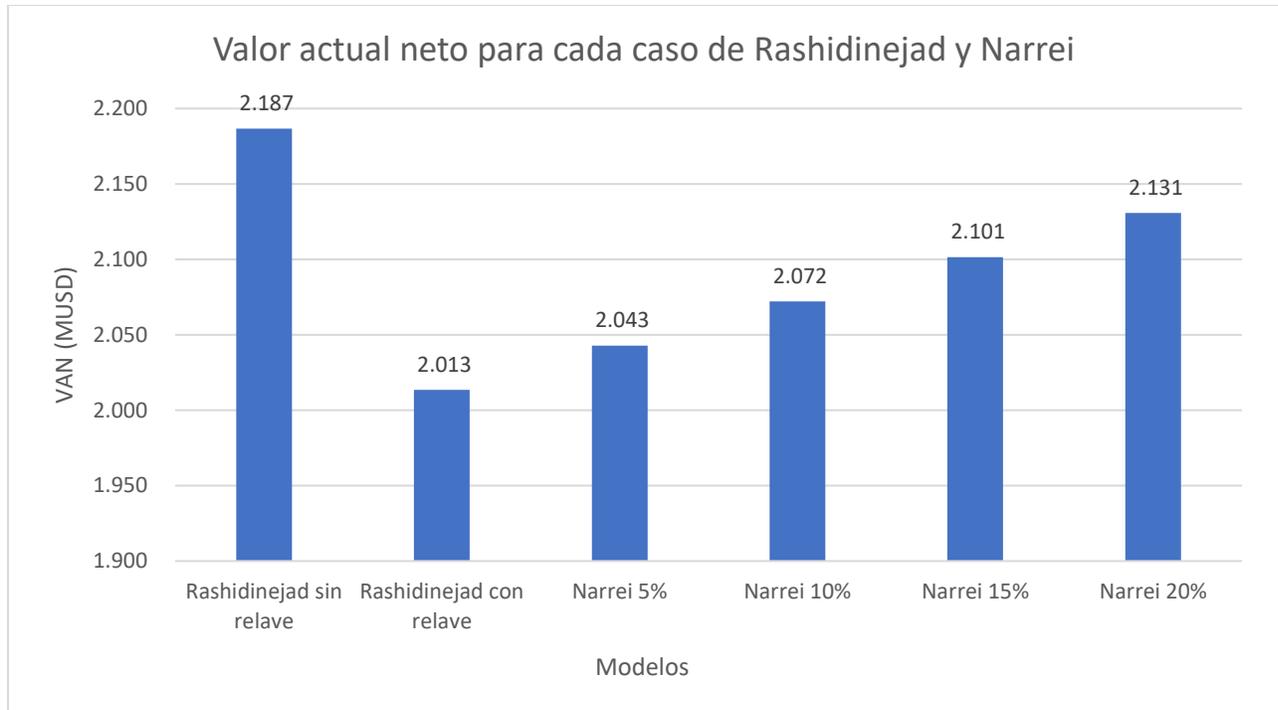


Figura 13: VAN versus modelos de Rashidinejad y Narrei

Al desarrollar la comparación del VAN, se observa cómo este experimenta un aumento a medida que avanzamos en dirección a Narrei, con una única excepción en Rashidinejad sin relaves. Nuevamente, esto es provocado por la eliminación del relave en el modelo, ya que, con una menor cantidad de costos, mayor será el beneficio anual de la sección estudiada y, por consiguiente, el VAN.

Por otro lado, la razón que explica el aumento desde Rashidinejad con relave hasta Narrei con la inclusión del 20% de los ingresos es únicamente provocada por el incremento de la ganancia considerada por Narrei, puesto que la ley de corte en estos casos no presenta una variación significativa. De hecho, se mantiene constante en 0,174. Por lo tanto, el crecimiento en el valor de VAN es ocasionado únicamente por el aumento en el porcentaje de ingresos considerado en el modelo.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La incorporación de factores medioambientales, como el drenaje ácido de mina, en el proceso de planificación minera, y más específicamente en la estimación de la ley de corte, permite una mayor prevención y una visión más realista tanto a lo largo de la vida útil de la mina como después de finalizada la operación. Es por este motivo que actualmente hay más investigadores interesados en incorporar dichos factores, como lo demuestran Gholamnejad (2008), Rashidinejad (2008) y Narrei (2015).

Los tres modelos investigados proporcionan una base sólida para el desarrollo, abordando de manera bastante completa las ecuaciones propuestas por Lane e incorporando las variables que cada uno consideró necesarias. Sin embargo, todos exhibieron ciertas deficiencias en sus estructuras. Por lo tanto, es crucial ofrecer recomendaciones y consideraciones específicas para cada uno de ellos.

Gholamnejad únicamente incorporó un costo asociado a la rehabilitación del drenaje ácido de mina. Una vez aplicada su metodología de manera efectiva, se observó que la ley de corte de la sección presentaba una tendencia a disminuir, sin tener en cuenta más que la inclusión de dicho costo. Aunque esta medida permitía enviar una menor cantidad de material al botadero, no consideraba ningún aumento en el costo de la planta debido al procesamiento de material de menor ley.

Por lo tanto, la recomendación para este modelo es que requiere una consideración del costo o la recuperación asociado al procesamiento del material para obtener resultados más realistas. Enviar material de menor ley a la planta puede generar deficiencias en la recuperación o daños en la infraestructura, lo cual conlleva costos que no fueron contemplados por el modelo 1. Además, el hecho de enviar una menor cantidad de material al botadero no garantiza una menor probabilidad de generación de drenaje ácido de mina.

Otra limitación de este modelo es la falta de inclusión de la diferenciación entre materiales NAF y PAF, ya que solo los generadores de ácido son motivo de preocupación al prevenir el drenaje ácido de mina.

Rashidinejad, por otro lado, tomó en cuenta más variables relacionadas con los materiales NAF y PAF extraídos que fueron enviados al botadero y a los relaves. Esto provocó una disminución en el valor de la ley de corte para el caso sin la inclusión de relaves y un aumento en el caso que sí se incluyeron los relaves, en comparación con la ley de corte del proyecto calculada con Lane.

En el caso 1, con una ley de corte más baja, se logró un mayor Valor Actual Neto (VAN), mientras que en el caso 2, con una ley mayor, se obtuvo un menor VAN. Esto se debe a que la incorporación de los relaves aumenta los costos, lo que implica la necesidad de procesar materiales con una ley mayor que paguen sus costos y a su vez entregue beneficio, acompañado de una disminución en el VAN, provocado por la inclusión de más costos al beneficio anual calculado.

En cuanto a las recomendaciones para este modelo, se sugiere considerar una variación en el costo asociado al procesamiento y refinación, teniendo en cuenta el aumento del material procesado en relación con el porcentaje de la ley de corte disminuido o aumentado. Esta recomendación busca proporcionar resultados más realistas, similar a la consideración planteada en el modelo anterior.

En el caso de Narrei, que presentó un modelo similar a Rashidinejad, pero con la adhesión de ingresos por la recuperación del tajo, se observó que la ley de corte se mantuvo relativamente constante al aumentar los ingresos, incrementando ligeramente con respecto a la ley de corte original de la sección. En cuanto al VAN, presentó un comportamiento directamente proporcional al aumento de dichos ingresos. De este modelo se puede concluir que no hay una mayor diferencia en la ley de corte a pesar de mayores ingresos, a diferencia del VAN que sí varía según los parámetros. Además, esta metodología no incluyó un tiempo en el cual se recuperarán las ganancias consideradas, lo cual se considera una limitación del modelo, ya que la ganancia por recuperación del tajo es un ingreso que solo se recibirá al final de la vida útil de la mina.

Narrei presentó en su artículo una selección del plan de recuperación, la cual no fue aplicada para el caso de estudio de este informe. Por lo tanto, no se descarta que la aplicación de esta etapa en la metodología podría inducir cambios en los resultados.

La propuesta de modelos como Rashidinejad y Narrei, que sugieren separar los materiales generadores de ácido de los no generadores, puede tener limitaciones en su aplicabilidad a casos reales. Esto se debe a que la diferenciación y la separación de estos materiales en depósitos distintos, como plantean en sus metodologías, pueden no ser prácticas en la realidad operativa de una mina.

El algoritmo de Lane destaca por su eficacia en la determinación de leyes de corte óptimas para maximizar el VAN. Sin embargo, presenta dificultades al considerar costos medioambientales o al intentar reducir el DAM. Este algoritmo se centra en buscar leyes que generen el máximo beneficio sin tener en cuenta si estas leyes son bajas o poco sostenibles, como se evidenció en la aplicación de la mayoría de los modelos estudiados.

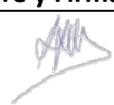
Por último, es importante destacar que la aplicación de estos modelos en proyectos mineros podría inducir cambios en la rentabilidad, especialmente durante los primeros años de la operación de la mina. Aunque no garantiza la eliminación total de la generación de DAM, su implementación en la planificación contribuiría significativamente a minimizar los problemas asociados este.

REFERENCIAS

- [1] Lardé, J., Chaparro, E. y Parra, C. (2008). El aporte del sector minero al desarrollo humano en Chile: el caso de la región de Antofagasta. CEPAL.
- [2] Comisión Chilena del Cobre. (2021). Exportación de concentrados de cobre: caracterización de condiciones comerciales.
- [3] López Pamo, E., & Aduvire y D. Baretino, O. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Igme.es.
- [4] Akcil, A. and Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1139-1145.
- [5] Briones E. (2012). Alternativas de tratamiento de sulfuros de baja ley codelco división andina. Valparaíso, Chile
- [6] Pashkevich, M. (2017). Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils. ACADEMIC PRESS, 1-32.
- [7] Akcil, A. and Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): Causes, Treatment and Case Studies. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1139-1145.
- [8] Hilson, G. & Muck, B. (2001). Progress toward pollution prevention and waste minimization in the North American gold mining industry. *Journal of Cleaner Production*, 9(5), 405-415
- [9] Harries, J. (1997). Acid mine drainage in Australia: Its extent and potential future liability.
- [10] Hustrulid, W. A., & Kuchta, M. (2006). *Open Pit Mine Planning & Design*. Taylor & Francis Group.
- [11] Mete, M. R. (s. f.). *VALOR ACTUAL NETO Y TASA DE RETORNO: SU UTILIDAD COMO HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN*.
- [12] Lane, K. F. (2018). *The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice*. COMET Strategy Pty Ltd.
- [13] Vickers, E. (1961). Marginal analysis-its application in determining cutoff grade. *Mining Engrg.* 13(6), 578–582

- [14] Henning, U. (1963). Calculation of cut-off grade. *Canadian Mining J.* 84(3), 54–57.
- [15] Lane, K. F. (2018). *The economic definition of ore: cut-off grades in theory and practice*. COMET Strategy Pty Ltd.
- [16] Gholamnejad, J. (2008). Determination of the Optimum Cutoff Grade Considering Environmental Cost. *J. Int. Environmental Application & Science*.
- [17] Rashidinejad, Farshad & Osanloo, M. & Rezai, Bahram. (2008). An environmental oriented model for optimum cut off grades in open pit mining projects to minimize acid mine drainage. *International Journal of Environment Science and Technology*, 5(2.5) 10.1007/BF03326012.
- [18] S. Narrei & M. Osanloo (2015) Optimum cut-off grade's calculation in open pit mines with regard to reducing the undesirable environmental impacts, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 29:3, 226-242
- [19] FUNDACIÓN CHILE. Buenas Prácticas en la Gestión de la Estabilidad Química en la Industria Minera. [online]. 2015. Vol. 53, no. 9, p. 1689–1699. Available from: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Buenas-Practicas.pdf>
- [20] Taylor, H.K., (1986) Article hard to very hard to find, available in Douglas Library under reference number TN1 I51.
- [21] Fustos, R. (19 de Julio de 2023). AIM Artificial Intelligence for Mining. <https://fustos.shinyapps.io/AIM-preview>

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: EVALUACIÓN DE ALGORITMOS DE LANE PARA EL CÁLCULO DE LEY DE CORTE CON INCLUSIÓN DE CONCEPTO DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN MINERÍA A CIELO ABIERTO		
Nombre Memorista: FRANCISCO IGNACIO ROJAS OLATE		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	MUY BUENO	 Prof. Asieh Hekmat
Calificación	6.7	
Fecha	27/03/2024	
 Prof. René Gómez P.		
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. Ramón Díaz		 Prof. Roberto Fustos
Resumen		
<p>El informe evalúa varios algoritmos de Lane desarrollados por investigadores diferentes para calcular la ley de corte en minería a cielo abierto, considerando el drenaje ácido de mina. Se comparan los algoritmos de Gholamnejad, Rashidinejad y Narrei, analizando sus variables y enfoques. Los resultados muestran deficiencias en todos los modelos: el modelo 1 solo considera costos de rehabilitación del drenaje ácido sin contemplar costos de procesamiento de minería de baja ley, el modelo 2 requiere ajustes en costos de procesamiento para ser realista, y el modelo 3 agrega ingresos por gestión del rajo que influyen en el VAN, pero no en la ley de corte.</p> <p>Incorporar costos de drenaje ácido en la ley de corte mejora la planificación y reduce impactos ambientales. Se sugieren recomendaciones específicas para mejorar la precisión y aplicabilidad de los modelos en la minería real. Esto subraya la importancia de considerar todos los costos y beneficios ambientales desde el inicio del ciclo minero para una gestión más sostenible y efectiva.</p>		