

**Optimización económica de la transportación con camiones en una mina a cielo abierto profunda**  
**Economic optimization of truck transportation in a deep open pit mine**

Manuel Fidel Sonhi-Manassa<sup>1\*</sup>

Ramón Gilberto Polanco-Almanza<sup>2</sup>

Arístides Alejandro Legrá-Lobaina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica de Luanda Sur, Angola.

<sup>2</sup>Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

\*Autor para la correspondencia: [fidelmanassa@hotmail.com](mailto:fidelmanassa@hotmail.com)

**RESUMEN**

El acarreo en minas a cielo abierto profundas encarece la explotación minera en la medida en que se incrementa la profundidad de la mina. El objetivo de presente estudio fue diseñar un plan de transportación económicamente óptimo para todo el tiempo de ejecución del proyecto. Con base en un modelo de cono truncado y su variante de paraboloides circular truncado se propuso un procedimiento para calcular la traza del camino minero para la transportación del mineral mediante camiones. A partir de los indicadores económicos anuales Valor Actual Neto y la relación Egreso/Ingreso se determinan los

mejores planes técnico-económicos anuales para las combinaciones posibles de varios modelos de camiones disponibles y se establece el modelo óptimo.

**Palabras clave:** transporte minero óptimo; camiones; caminos mineros; minería a cielo abierto; minas profundas; modelación geométrica.

## **ABSTRACT**

Carrying in deep open-pit mines makes mining more expensive as the depth of the mine increases. The objective of this study is to design an economically optimal transportation plan for the entire project execution time. From a model of truncated cone and its variant of truncated round paraboloid a procedure is proposed for calculating the trace of the mining road to transport the ore by trucks. From the annual economic indicators Net Present Value and the income and expenditure Ratio, the best annual technical-economic plans for the possible combinations of several available truck models are determined and the optimum model is established.

**Keywords:** optimal mining transportation; trucks; mining roads; opencast mining; deep mines; geometric modeling.

Recibido: 13/11/2018

Aceptado: 13/12/2018

## INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto es uno de los dos modos principales de explotación que existen para la realización de la extracción de las materias primas minerales de la corteza terrestre. Esta elección es económicamente atractiva cuando la relación escombro/mineral no supera los valores límites y cuando las características del cuerpo mineral permiten la utilización de tecnologías eficientes para el minado y el acarreo del escombro y del mineral. Una tendencia indiscutible del desarrollo de la minería mundial muestra una orientación definida hacia el método de explotación a cielo abierto, que asegura los mejores parámetros económicos ([Bajturin 2009](#)).

La modelación geológica 3D es una representación espacial de la distribución mineral en una porción de la corteza terrestre basada en datos geofísicos y geológicos. La modelación se inició en versiones de 2D, pero las posibilidades de las tecnologías actuales brindan una gama de herramientas digitales que permiten la modelación 3D y con ello incrementar el rendimiento y disminuir los costos ([Sirelda y Resmi 2017](#)).

Como en otras industrias, las principales preocupaciones en la industria minera moderna están relacionadas con las fuentes de obtención de las finanzas y el costo financiero del desarrollo de nuevos proyectos, así como el aseguramiento de un flujo efectivo rentable en las operaciones existentes ([Sides 1997](#)).

Es importante establecer cuándo una mina a cielo abierto se denomina "mina profunda". Un análisis histórico realizado por varios autores demostró en este caso que ese término no es constante, sino que varía en dependencia del desarrollo de las fuerzas productivas ([Yakovlev y Stolaniarov 2003](#)). La influencia del progreso técnico en la industria minera ha provocado que el término sufriera variaciones y

en los años 80 del siglo anterior el académico V. V. Rshvskiy consideró como minas profundas las que sobrepasaban los 200 m y planteó las particularidades que caracterizaban su explotación ([Rshvsky, Istomin, Truvetskoy y Peshkov 1988](#))

Más recientemente, algunos investigadores ([Yakovlev y Stolaniarov 2003](#); [Yakovlev, Tarasov y Shurabliv 2006](#)) han considerado como minas profundas aquellas donde la utilización del sistema de transporte y el esquema de apertura previstos inicialmente no aseguren la explotación rentable de los horizontes inferiores de la mina sin la implementación de cambios o mejoras. Considerando este enfoque el concepto "mina profunda" depende, en primer lugar, de condiciones técnicas concretas y, en segundo lugar, puede variar en el tiempo en dependencia de las condiciones técnicas.

Se ha propuesto ([Yakovlev, Tarasov y Shurabliv 2006](#)) clasificar las minas a partir de las condiciones de operación del transporte minero y en función de la pendiente de los caminos y del modelo adecuado de vehículo. Las clasificaciones declaradas son:

- Minas de montañas -sobre el nivel del terreno y profundidad máxima de 50 m
- Minas poco profundas -con profundidad hasta 200 m
- Minas profundas -con profundidad hasta 400 m
- Minas extra profundas -con profundidad hasta 600 m
- Minas súper profundas -con profundidad superior a 600 m.

En la medida en que se incrementa la profundidad de una mina la participación del proceso de transportación en los gastos de explotación supera el 55 % y, en ocasiones, alcanza el 70 % de los

gastos totales de explotación de la mina ([Yakovlev, Batjurin y Stoliarov 2015](#)).

A partir de la profundidad de 150 m los mejores índices económicos lo muestra el esquema combinado automotor-elevador *skip*, que a pesar de ello no ha obtenido una gran difusión debido a las limitaciones de la capacidad de carga de los elevadores que no supera las 40 t-50 t ([Nikolaev 2012](#)).

El transporte automotor es el más difundido en la explotación de minas a cielo abierto profundas, incluyendo los esquemas cíclicos y cíclico-continuos. En los últimos 10-15 años empeoraron las condiciones de explotación en las minas a cielo abierto: la profundidad de muchas minas ha sobrepasado los 400 m-500 m, la distancia de transportación de la masa minera se extiende hasta los 8 km-10 km, los tramos con pendientes alcanzan hasta el 70 % y más de la traza total. Con la profundización de las operaciones mineras aumenta el volumen de rocas estériles a extraer. Todo ello reduce su productividad e incrementa el consumo de energía. Debido a las grandes profundidades de las minas también empeoran las condiciones ecológicas ([Rasskasov 2010](#)).

En las minas a cielo abierto profundas, la función principal durante el traslado del mineral por trazas muy inclinadas la ejecuta el transporte interior que, en profundidades significativas, adquiere las especificidades:

- Incremento significativo de la distancia de transportación.
- Incremento de los sectores del camino minero con tramos de grandes pendientes.
- Surge la necesidad de utilización de diferentes tipos de transporte minero para lograr un mejor resultado.

- Las limitaciones de espacio de los frentes de trabajo dificultan la maniobrabilidad de las operaciones del transporte.
- Ocurre con mayor frecuencia el cambio de las vías y los puntos de recarga internos.
- Se hace más complejo el servicio de reparación y mantenimiento de los medios de transporte ([Vasiliev 1983](#)).

La optimización de una mina a cielo abierto puede comenzar desde su concepción, durante la planificación de la extracción de mineral y pasar por la operación en sí hasta su desmantelamiento ([Dagdelen 2001](#)).

La selección de equipos para aplicaciones de minería no es un proceso bien definido y debido a que involucra la interacción de varios factores o criterios subjetivos, las decisiones a menudo son complicadas e incluso pueden incorporar contradicciones ([Bazzazi, Osanloo y Karimi 2009](#)).

El objetivo del presente trabajo es describir un procedimiento para analizar con cuál de los modelos de camiones disponibles se define un plan de transportación económicamente óptimo para el tiempo que dure el proyecto.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El desarrollo de la presente investigación teórica se basa en el conocimiento de:

1. Las características geométricas del yacimiento

2. El diseño de su explotación
3. Los parámetros económicos de la actividad de transportación durante esta explotación.

El principio básico de la investigación es que la optimización de la transportación es posible realizarla a partir de una modelación económica que considere sus parámetros así como un modelo geométrico del diseño de la explotación; este modelo tiene en cuenta las características lineales, superficiales y volumétricas del yacimiento.

La metodología aplicada en este trabajo se describe mediante las tareas:

1. Presentar un modelo de cono truncado para la minería profunda a cielo abierto así como su variante de paraboloide circular truncado.
2. Establecer un procedimiento para calcular las trazas de un camino minero para la transportación del mineral mediante camiones.
3. Establecer un modelo de la transportación anual en una mina a cielo abierto profunda.
4. Describir los indicadores económicos anuales Valor Actual Neto y la relación Egreso/Ingreso.
5. Describir el procedimiento para determinar los mejores planes técnico-económicos anuales para las combinaciones posibles de los modelos de camiones disponibles.
6. Describir un procedimiento para analizar con cuál de los tipos de camiones disponibles se define un plan de transportación

económicamente óptimo para todo el tiempo que dure el proyecto.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Modelo geométrico para una mina a cielo abierto profunda**

Sea el sistema de coordenadas tridimensionales  $XYZ$  donde  $Z$  es la cota respecto al nivel del mar. Se tomará como premisa que el espacio de la mina puede representarse mediante un cono truncado, cuestión que, en términos geométricos, es común tal como se observa para diversas minas de este tipo que hoy se explotan en el mundo.

Se suponen conocidos los valores: Cota superior del cuerpo mineral:  $Z_S$ ; cota inferior del cuerpo mineral:  $Z_I$ ; radio superior  $R_S$  del perímetro de la mina en la superficie; y  $A$  es el ángulo del bordo inactivo de la mina definido por el plano  $Z=Z_0$  y la directriz del cono.

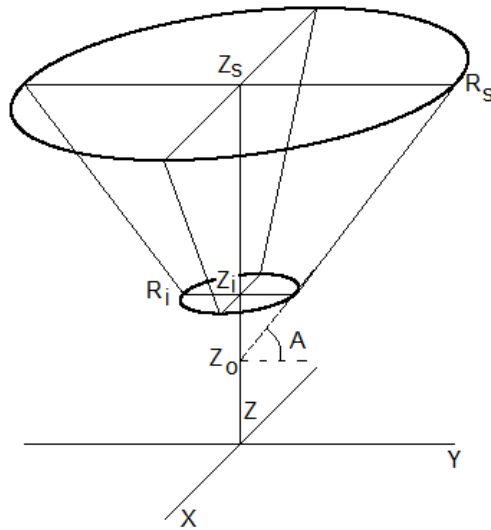
El modelo de cono truncado que se propone es:

$$Z = Z_0 + C\sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1)$$

Donde  $C$  es el coeficiente del cono,  $Z_0$  la altura de su vértice y el radio inferior  $R_I$  de la superficie circular inferior (fondo de la mina, [Fig. 1](#)).

$C$ ,  $Z_0$  y  $R_i$  se calculan mediante fórmulas geométricas y trigonométricas:  $C = \tan(A)$ ;  $Z_0 = Z_S - C R_S$ ;  $R_i = (Z_I - Z_0)/C$





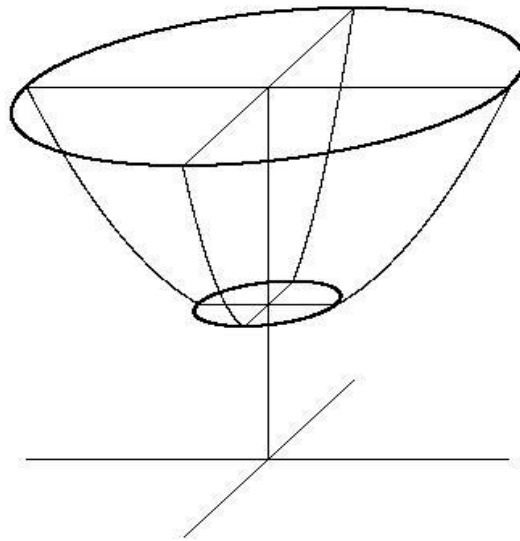
**Fig. 1** - Modelo de cono truncado de una mina a cielo abierto profunda.

A partir de este modelo y mediante procedimientos geométricos es posible calcular varios elementos tales como perímetros, áreas y volúmenes que son necesarios para los cálculos económicos del proyecto ([Bronshtein et al. 2007](#)).

Una variante del modelo anterior es el modelo de paraboloides circular truncado, cuya ecuación es:

$$Z = Z_0 + C^2(X^2 + Y^2) \quad (2)$$

Su representación gráfica se muestra en la figura 2.



**Fig. 2** - Modelo de paraboloide circular truncado.

### **Procedimiento para calcular las trazas de un camino minero para la transportación del mineral mediante camiones**

El primer paso consiste en establecer los puntos inicial  $P_1=(X_1;Y_1;Z_1)$  con radio  $R_1$  y final  $P_f=(X_f;Y_f;Z_f)$  del camino con radio  $R_f$ . También se define la pendiente  $M$  del camino (en %) y el Factor  $\mathbf{p}$  que define aproximadamente la longitud de cada tramo del camino minero.

Cada tramo  $T_j$  ( $j=1,2,\dots,N$ ) queda descrito por el punto inicial del tramo  $(X_j;Y_j;Z_j)$ , la longitud del tramo  $L_j$  y su radio de curvatura  $R_j$ . Por ejemplo, el primer tramo ( $j=1$ ) se calcula en los siguientes pasos:

- a. Ángulo recorrido acumulado:  $t = 0$
- b. Tamaño del camino calculado:  $B = 0$
- c. Punto inicial:  $(X_j;Y_j;Z_j)=(X_1;Y_1;Z_1)$

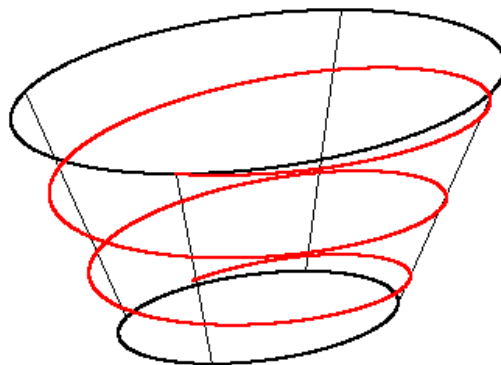
- d. Radio en el punto inicial del tramo. Para el modelo de cono se calcula:  $R_j := (Z_j - Z_0) / C$  y para el modelo de paraboloides se calcula:  $R_j := (Z_j - Z_0)^{0.5} / C$ .
- e. Diezmilésima del perímetro de la circunferencia:  $D = 2 \pi R_j / 10000$
- f. El factor de paso para Z es:  $E = D M / 100$
- g. Valor de Z al finalizar el tramo:  $Z_{j+1} = Z_2 = Z_j - E$
- h. Radio en el punto final del tramo:  $R_{j+1} = R_2 = (Z_{j+1} - Z_0) / C$  para el modelo de cono  $R_{j+1} = R_2 = (Z_{j+1} - Z_0)^{0.5} / C$  para el modelo de paraboloides.
- i. Ángulo recorrido acumulado:  $t := t + 2 \text{ArcSen} (D / (2 R_{j+1}))$
- j.  $X_{j+1} = X_2 = R_{j+1} \text{Cos} (t)$
- k.  $Y_{j+1} = Y_2 = R_{j+1} \text{Sen} (t)$
- l.  $L_j = L_1 = \sqrt{(X_{j+1} - X_j)^2 + (Y_{j+1} - Y_j)^2}$
- m. Camino recorrido acumulado:  $B = B + L_j$

Los pasos C hasta M se repiten para  $j=2,3,\dots$  hasta que se obtenga que  $Z_{j+1}$  es menor o igual que  $Z_f$  y de esta manera queda determinado N. Los resultados se expresan como se muestra en la tabla 1:

**Tabla 1** - Datos de tres tramos de un camino minero

No	X	Y	Z	Longitud de Tramo	Radio de Curvatura
1	X <sub>1</sub>	Y <sub>1</sub>	Z <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>
2	X <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub>	Z <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	R <sub>2</sub>
3	X <sub>3</sub>	Y <sub>3</sub>	Z <sub>3</sub>	L <sub>3</sub>	R <sub>3</sub>

Una visualización aproximada del camino minero para el modelo de cono es presentada en la figura 3.



**Fig. 3** - Visualización del camino minero definido por tramos sobre un modelo de cono truncado.

### **Modelo básico de transportación anual en una mina a cielo abierto profunda**

El modelo consiste en una tabla que define la longitud del camino y el flujo anual (Q años) de mineral a transportar. Este se puede caracterizar utilizando diversos criterios y en este trabajo se consideran las opciones:

1. Volumen fijo en cada año. Debido a que el radio disminuye cuando aumenta la profundidad entonces con el transcurso del tiempo se alcanza rápidamente grandes profundidades.
2. Profundidad fija en cada año. Al transcurrir el tiempo e incrementarse la profundidad el volumen a minar y a transportar disminuye.
3. Si se conoce el volumen. Cuando el valor del volumen ya está escrito en la columna correspondiente de la tabla, entonces se calcula el resto de las columnas.
4. Si se conoce la cota. Cuando el valor de la cota ya está escrito en la columna correspondiente de la tabla entonces se calcula el resto de las columnas.

El resultado es semejante a la tabla 2.

**Tabla 2 - Modelo básico del flujo anual**

<b>Año</b>	<b>Cota Final</b>	<b>Radio Inferior</b>	<b>Longitud del camino</b>	<b>Volumen</b>	<b>% es Mineral</b>
1	Z <sub>1</sub>	R <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	V <sub>1</sub>	p <sub>1</sub>
2	Z <sub>2</sub>	R <sub>2</sub>	L <sub>2</sub>	V <sub>2</sub>	p <sub>2</sub>
3	Z <sub>3</sub>	R <sub>3</sub>	L <sub>3</sub>	V <sub>3</sub>	p <sub>3</sub>

### **Indicadores económicos anuales Valor Actual Neto y la relación Egreso/Ingreso**

En todo análisis económico deben definirse los egresos e ingresos periódicos del proyecto. En el caso que se estudia se asumirán períodos de un año.

Los ingresos en el año "j" se calculan multiplicando el valor  $F$  de una unidad ( $m^3$ ) de mineral transportado una longitud de 1 km, por el volumen que se transporta en el año, y por la longitud  $L_j$  recorrida ese año. O sea:  $I_j = F V_j L_j$  donde se suponen descontados los impuestos. El resultado es una tabla similar al modelo de la tabla 3.

Los egresos  $E_j$  de un año se calculan sumando:

- Costo de construcción de caminos en el año (teniendo en cuenta el ancho y el talud del camino, [Fig. 4](#)).



**Fig. 4** - Perfil de un camino en ladera.

- Costo anual de mantenimiento de los caminos disponibles.
- Costo del uso y mantenimiento de equipos de carga.
- Costos de cierres de caminos y zonas de carga y descarga que es una contribución explícita al cuidado medioambiental.

**Tabla 3 - Egresos e ingresos básicos generales**

<b>Año</b>	<b>Precio Caminos</b>	<b>Zona de carga y descarga</b>	<b>Construye carreteras</b>	<b>Mantenimiento y cierre de carreteras</b>	<b>Valor del mineral transportado</b>
1	PC <sub>1</sub>	PZCD <sub>1</sub>	PCC <sub>1</sub>	MCC <sub>1</sub>	VMT <sub>1</sub>
2	PC <sub>1</sub>	PZCD <sub>2</sub>	PCC <sub>2</sub>	MCC <sub>2</sub>	VMT <sub>2</sub>
3	PC <sub>1</sub>	PZCD <sub>3</sub>	PCC <sub>3</sub>	MCC <sub>3</sub>	VMT <sub>3</sub>

Los resultados de los egresos pueden considerarse invariantes para cada diseño de la mina y su optimización depende de las características del macizo rocoso, del diseño de los elementos que intervienen en la transportación (los caminos y frentes de trabajo) y de la selección del equipamiento más adecuado para cada proceso tecnológico. Otros egresos están relacionados con la explotación de los camiones, lo cual se verá a continuación.

Los indicadores económicos que se proponen para estudiar la eficiencia económica, anual y de tendencia, de la transportación del mineral en una mina a cielo abierto profunda son:

Relación Egreso/Ingreso en el año j

$$REI = \frac{E_j}{I_j} \quad (3)$$

Valor Actual Neto para Q años

$$VAN = -E_o + \sum_{j=1}^Q \frac{(I_j - E_j)}{(1 + TI)^j} \quad (4)$$

Donde TI es la tasa de interés y  $E_0$  es el egreso por la inversión inicial antes de comenzar el proceso de transportación.

La rentabilidad de un proyecto es su capacidad para generar un excedente de fondos o un rendimiento que no guarda relación con la liquidez. La rentabilidad de la inversión se mide por el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa de Rentabilidad Interna (TRI) ([López-Jimeno 1991](#)).

### **Procedimiento para determinar los planes técnico-económicos anuales más racionales para las combinaciones posibles de tres tipos de camiones**

En general el asunto consiste en determinar entre varios modelos de camiones de los cuales se conocen sus parámetros técnicos cuál es la combinación de estos modelos tal que en cada año posibilita una transportación eficaz (garantiza los flujos programados en el tiempo previsto) de la manera más eficiente posible. En este trabajo se considerarán varios modelos de camiones y a modo de ejemplo en la tabla 4 se muestran algunos de sus parámetros:

**Tabla 4** - Parámetros técnico-económicos de tres modelos de camiones

Tipo de camión	Pendiente máxima permisible, %	Velocidad máxima, km/h	Volumen máximo, m <sup>3</sup>	Precio, \$	Radio de curvatura, m	Costo 1 m <sup>3</sup> x 1 km x 1%, \$	Duración, Años	Disponibilidad, %
Tipo 1	PMP <sub>1</sub>	VeM <sub>1</sub>	VoM <sub>1</sub>	Pr <sub>1</sub>	RC <sub>1</sub>	CU <sub>1</sub>	DA <sub>1</sub>	Di <sub>1</sub>
Tipo 2	PMP <sub>2</sub>	VeM <sub>2</sub>	VoM <sub>2</sub>	Pr <sub>2</sub>	RC <sub>2</sub>	CU <sub>2</sub>	DA <sub>2</sub>	Di <sub>2</sub>
Tipo 3	PMP <sub>3</sub>	VeM <sub>3</sub>	VoM <sub>3</sub>	Pr <sub>3</sub>	RC <sub>3</sub>	CU <sub>3</sub>	DA <sub>3</sub>	Di <sub>3</sub>



Un asunto de primera importancia es calcular cuántos camiones de ciertos modelos son necesarios para garantizar cada año el flujo planificado. Para ello se definen variantes donde se combinan los tipos de camiones disponibles para el análisis. Por ejemplo: para tres modelos de camiones se pueden probar las  $7=2^3-1$  combinaciones: modelo 1; modelo 2; modelo 3; modelo 1 y 2; modelo 1 y 3; modelo 2 y 3; modelo 1, 2 y 3. Se siguen los pasos:

- Para cada modelo de camión  $k=1,2,3$  en el año  $j$  se calcula la cantidad de viajes a realizar en un día:

$$CV_{kj} = 24/(tc+td+2LA_j/V_k) \quad (5)$$

Donde  $V_k$  es la velocidad promedio del camión de tipo  $k$  y  $LA_j$  es el recorrido acumulado hasta el año  $j$ .

- Para  $k=1,2,3$  se calculan el volumen anual a transportar un camión del tipo  $k$  en el año  $j$ :

$$VA_k = 365 V_k CV_{kj} \quad (6)$$

Donde  $V_k$  es el volumen máximo que transporta un camión de modelo  $k$ .

- En cada año se prueban todas las combinaciones de camiones de los modelos definidos en la combinación y se conservan aquellas que garantizan suficientemente el flujo previsto para el año (soluciones factibles).
- Para cada año se seleccionan entre las soluciones factibles obtenidas en el paso anterior aquellas que tengan el menor gasto posible, entendiendo este como la suma del coste, mantenimiento y explotación del total de los camiones en explotación.

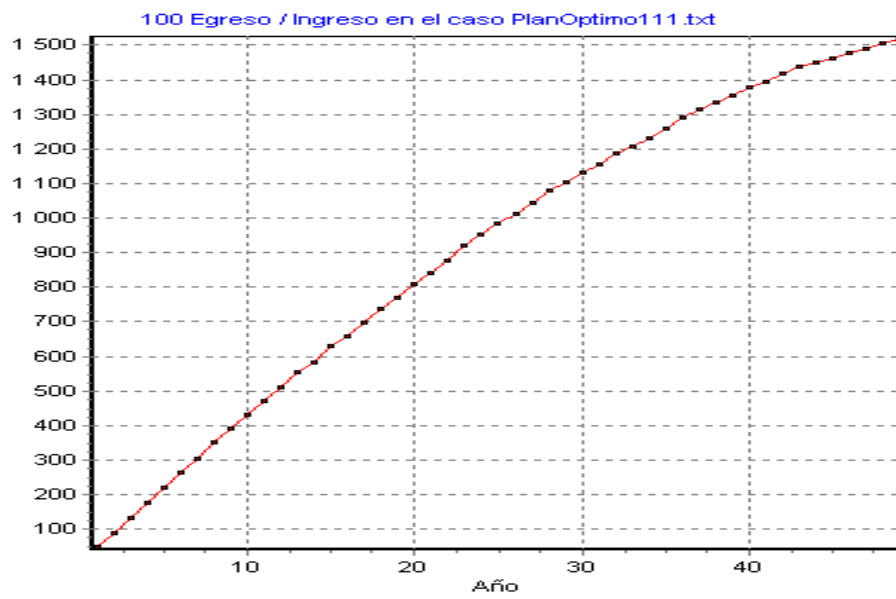
Los resultados obtenidos para el caso modelos 1, 2 y 3 son semejantes a los que se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5** - Combinaciones factibles de modelos de camiones

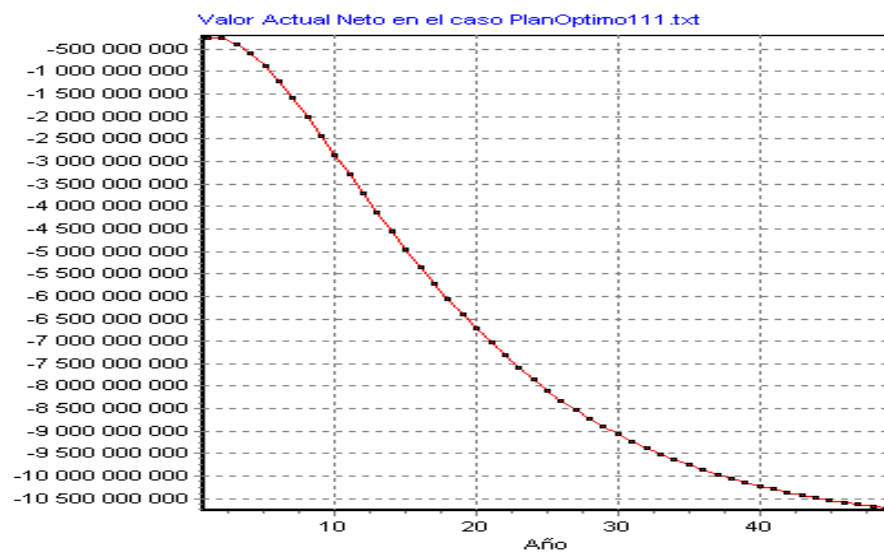
<b>Año</b>	<b>NT<sub>1</sub></b>	<b>NT<sub>2</sub></b>	<b>NT<sub>3</sub></b>	<b>Volumen anual</b>	<b>Costo compra de camiones</b>	<b>Costo de explotación de camiones en el año</b>
1	NT <sub>11</sub>	NT <sub>21</sub>	NT <sub>31</sub>	VA <sub>1</sub>	CCC <sub>1</sub>	CEC <sub>1</sub>
2	NT <sub>12</sub>	NT <sub>22</sub>	NT <sub>32</sub>	VA <sub>2</sub>	CCC <sub>2</sub>	CEC <sub>2</sub>
3	NT <sub>13</sub>	NT <sub>23</sub>	NT <sub>33</sub>	VA <sub>3</sub>	CCC <sub>3</sub>	CEC <sub>3</sub>

Todas las combinaciones son referidas a cumplir el plan de transportación del año señalado en la primera columna. Por ejemplo, en la fila 2 (correspondiente al año 2) se expresa que con NT<sub>12</sub> camiones del modelo 1, NT<sub>22</sub> del tipo 2 y NT<sub>32</sub> del modelo 3 se garantiza el volumen de transportación suficientemente aproximado al volumen demandado por el plan de minería. Se destaca que en la última columna se incluye el mantenimiento y el costo del combustible y otros insumos.

Finalmente para cada año se determina cuál es la mejor combinación de modelos de camiones que minimiza los egresos ya que los ingresos son relativamente constantes. La figura 5 (a y b) muestra ejemplos de los comportamientos de REI y VAN para un proyecto de 50 años.



a)



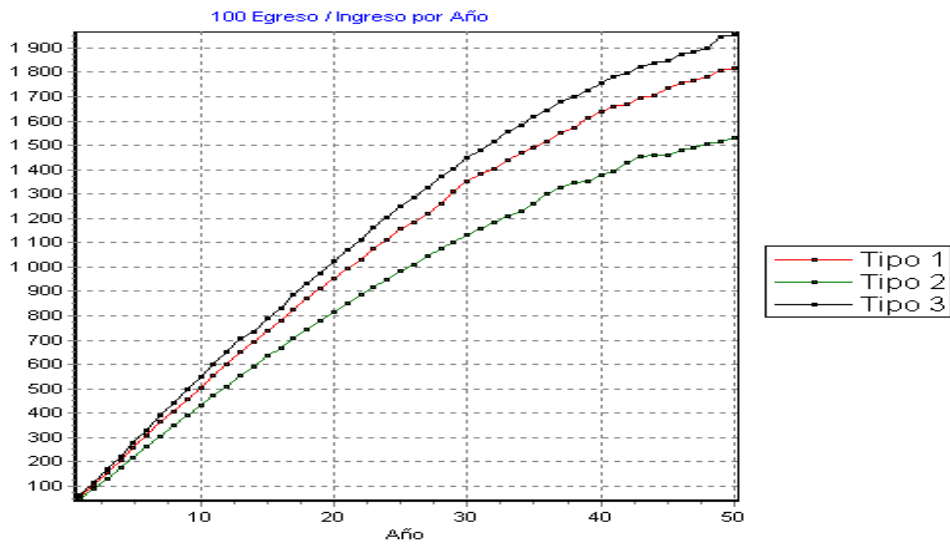
b)

**Fig. 5** - a) Comportamiento anual del REI en porcentaje. b) Comportamiento anual del VAN.

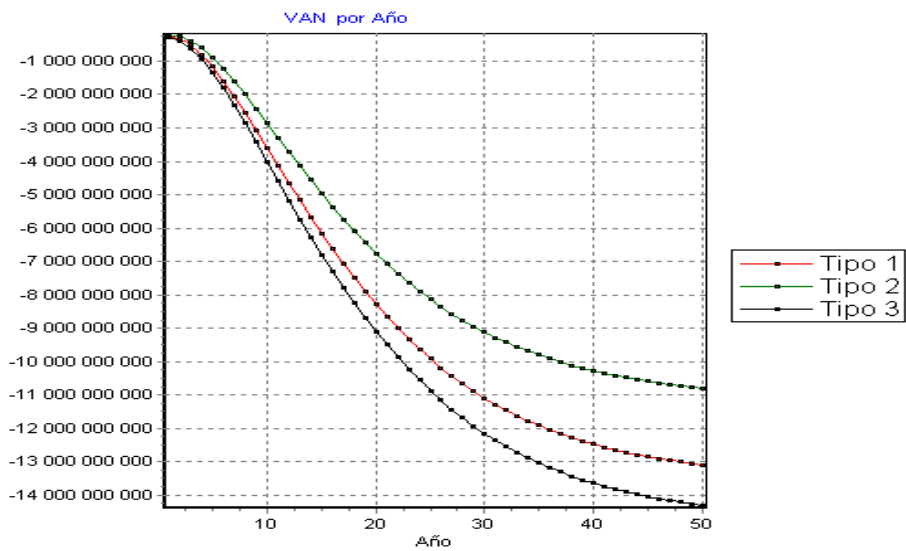
**Procedimiento para analizar con cuál de los modelos de camiones disponibles se define un plan de transportación económicamente óptimo para el tiempo que dure el proyecto**

Un análisis importante es posible cuando se asume que solo se utilizará un solo modelo de camión durante todo el proyecto. Para determinar cuál es el mejor modelo de camión pueden probarse, por separado, las combinaciones de los modelos disponibles y finalmente se seleccionan las de mejor comportamiento general de los indicadores REI y VAN.

En la figura 6 (a y b) se muestran ejemplos de los comportamientos de los indicadores económicos REI y VAN de los modelos de tres modelos camiones disponibles para un proyecto de 50 años.



a)



b)

**Fig. 6** - a) Comportamiento del REI para tres modelos de camiones. b) Comportamiento del VAN para tres modelos de camiones.

En estos casos el VAN disminuye en la medida en que aumenta la profundidad de la mina y, por ende, la longitud de los caminos.

## CONCLUSIONES

- Se presentan los modelos de cono truncado y de paraboloides circular truncado para la minería a cielo abierto profunda que aproxima la descripción geométrica de una mina de este tipo. Se determinó un procedimiento para calcular las trazas de un camino minero para la transportación mediante camiones.
- Se establece un modelo de la transportación anual en una mina a cielo abierto profunda y se describieron los indicadores económicos anuales Valor Actual Neto y la relación Egreso/Ingreso.
- Se describe un procedimiento para determinar los mejores planes técnico-económicos anuales para las combinaciones posibles de tres modelos de camiones y para analizar con cuál de los modelos de camiones disponibles se define un plan de transportación económicamente óptimo para el tiempo de ejecución del proyecto.

## REFERENCIAS

- Bajturin, Y. A. 2009: Tendencias actuales de desarrollo del transporte minero. *Boletín Informativo-analítico Minero*, 7: 403-414.  
Consultado: 7 abril 2017. Disponible en:  
<https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tendentsii-razvitiya-kariernogo-transporta>.
- Bazzazi, A. A.; Osanloo, M. y Karimi, B. 2009: Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach. *Archives of Mining Sciences*, 54(2): 301-320.

Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <http://archiwum.img-pan.krakow.pl/index.php/AMS/article/view/419>

Bronshtein, I. N.; Semendyayev, K. A.; Musiol, G. y Mühlhig, H. 2007: *Handbook of Mathematics*. Berlin: Springer-Verlag. 1 163 p. ISBN: 978-3-540-72121-5.

Dagdelen, K. 2001: Open pit optimization-strategies for improving economics of mining projects through mine planning. Proceedings of the 17 International Mining Congress and Exhibition of Turkey IMCET2001. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/fbd8/79285038605a5ee16b0d461a69a1824bc76a.pdf>

López-Jimeno, C. 1991: *Manual de evaluación técnico-económica de proyectos mineros de inversión*. España: Instituto Tecnológico Geominero de España. 632 p. ISBN: 84-7840-077-X. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <http://www.info.igne.es/sibpdf>.

Nikolaev, Y. A. 2012: Perspectiva de utilización de diferentes tipos de transporte en minas a cielo abierto profundas. *Revista Minera de Kazajstán*, 2: 22-26.

Rasskasov, V. A. 2010: *Pronóstico de los parámetros de fiabilidad de camiones de gran capacidad en minas a cielo abierto profundas*. Tesis doctoral. Biblioteca Electrónica de Tesis de Doctorados. Moscú. 134 p. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <http://www.dissercat.com/content>.

Rshevsky, V. V.; Istomin, V. V.; Truvetskoy, K. N. y Peshkov, A. A. 1988: Explotación a cielo abierto de yacimientos profundos. *Gorny Journal*, 5: 13-19. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <http://rudmet.ru/search/?searchid=2074246&text=Горныйжурнал№5%2C1988г.с13-19>

- Sides, E. J. 1997: Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining. *Geologische Rundschau*, 86(2): 342-353. ISSN. 0016-7835. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s005310050145#citeas>
- Sirelda, B. y Resmi, K. 2017: The Ore Deposit 3D Modelling, New Effective Solution in the Optimization of Geological and Mining Works. *Earth Sciences*, 6(3): 35-43. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/earth>. ISSN: 2328-5982.
- Vasiliev, M. V. 1983: *Transporte en minas en cielo abierto profundas*. Moscú: Nedra. 295 p.
- Yakovlev, A. G. y Stoliarov, V. L. 2003: Aspectos terminológicos de la minería a cielo abierto en minas profundas. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/article/n/terminologicheskie-aspekty-problemy-glubokih-karierov>.
- Yakovlev, A. G.; Batjurin, Y. A. y Stoliarov, V. L. 2015: Aspectos principales y nuevas direcciones de la investigación de sistemas de transportación.
- Yakovlev, A. G.; Tarasov, V. L. y Shurabliv, P. I. 2006: Teoría y práctica de la utilización de recursos energéticos en la explotación minera a cielo abierto. Consultado: 7 abril 2017. Disponible en: <https://cyberleninka.ru/stm-010.xml>.