

La aplicación de un modelo en la gestión de neumáticos OTR permite hacer visible las oportunidades de mejora, así como hacer una evaluación cuantitativa y cualitativa.



Modelo matemático para la gestión de la vida útil de neumáticos OTR en minería

Mathematical Model for the Management of OTR Tires Useful Life in Mining

RESUMEN

El presente artículo propone brindar una alternativa de solución para gestionar neumáticos especializados para trabajos de minería (*Off The Road* - OTR). Para ello, el objetivo ha sido desarrollar un modelo matemático que considere la influencia de factores internos y externos de los neumáticos OTR en acarreo mina. Se ha considerado como material de estudio una mina de pórfido de cobre del Perú, explotada bajo el método cielo abierto; tomando como muestra los neumáticos de las marcas «A» Y «B»; medidas estándar OTR de 59/80R63, 53/80R63 Y 40.00R57 de 75 camiones mineros (marcas «U», «V», «X», «Y», «Z» de capacidades nominales de 360, 220, 290, 290 y 220 TM respectivamente).

La metodología empleada ha considerado los siguientes procedimientos: 1) levantamiento de información preliminar (toma de datos) en campo de los principales factores influyentes; 2) procesamiento de información en gabinete en relación con la presión de inflado, la rotación, el gemelado, el indicador de toneladas – kilómetros/hora (TKPH), la superficie de terreno con la escultura, la profundidad de banda de rodamiento, la condición de vías, el diseño de vías, el soporte de equipos auxiliares, el mantenimiento del equipo y la influencia del operador; 3) ajuste y desarrollo del modelo matemático; y 4) evaluación de la aplicación del modelo matemático para la gestión de los neumáticos OTR.

Se ha desarrollado un modelo matemático que considere la influencia de los factores en el consumo de neumáticos OTR, aplicando modelos de regresión lineal y cuadrático. Existen muy pocos modelos que representen los inconvenientes de

la gestión de los neumáticos para acarreo mina. Por eso, la aplicación del modelo propuesto en la gestión de neumáticos OTR, permite visibilizar las oportunidades de mejora, así como realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa.

Finalmente, este artículo contribuye a la minería, ya que genera un indicador que sea medible, aplicable y sea antecedente para futuras gestiones del acarreo en mina.

ABSTRACT

This article proposes to provide an alternative solution for the management of OTR tires. To this end, the objective has been to develop a mathematical model that considers the influence of internal and external factors of OTR tires during hauling. This study focuses on a copper porphyry mine in Peru, exploited under the open-pit method; using as samples the tires of brands "A" and "B" as shown; standard OTR measures of 59/80 R 63, 53/80 R 63 and 40.00 R 57, 75 mining trucks ("U", "V", "X", "Y", "Z", nominal capabilities of 360, 220, 290, 290 and 220 metric tons respectively).

The methodology includes the following procedures: 1) on-site preliminary information collection (data-gathering) of the main influencing factors; 2) in-switchgear information processing concerning: Inflation pressure, rotation, twinning, ton-kilometer per hour, terrain surface with sculpture, bandwidth depth, path condition, path design, auxiliary equipment support, equipment maintenance, and operator influence; 3) adjustment and development of the mathematical model; and 4) assessment of the effects of the application of the mathematical model for the management of OTR tires.



Palabras clave

Cocada, costo de remanente, neumáticos para trabajos mina, vida útil de neumáticos, gestión de neumáticos especializados.

Key words

Tire track, remaining cost, tires for Mine works, off tires road, life used of tires, management of specialized tires.

A mathematical model has been developed that considers the influence of factors on the consumption of OTR tires, applying linear and quadratic regression models. There are very few models that represent the inconveniences of mine tire handling. Therefore, the application of the proposed model in the management of OTR tires makes it possible to make improvement opportunities visible, as well as to make a quantitative and qualitative evaluation.

Finally, this article contributes to mining to generate an indicator that is measurable, applicable and antecedent for future management of mine haulage.

INTRODUCCIÓN

Luego de la crisis minera de 2008, la demanda de neumáticos especializados para trabajos de minería (*Off the Road* - OTR) se ha incrementado notoriamente. Situación que se relaciona directamente con el aumento de las flotas de acarreo, la creciente actividad minera y el desarrollo de grandes proyectos mineros en el mundo (como el caso de Perú).

Sin embargo, hay una oferta limitada de esta clase de neumáticos (que deben cumplir con la mayoría de las necesidades del consumidor), debido a que son escasas las empresas especializadas en fabricarlas, la cantidad de materiales empleados en su fabricación y su compleja reutilización luego de ser desechados. Los neumáticos OTR son el factor clave según expertos en el mundo de la minería a tajo abierto, por lo tanto, extender la vida útil es un pilar fundamental dentro de la estrategia de gestión de las compañías mineras.

En la actualidad, no existe algún antecedente sobre un modelo matemático que permita medir la gestión de neumáticos OTR. Sabemos que esto resulta crítico, ya que hemos escuchado constantemente la frase: «Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre», acuñada por el físico Lord Kelvin (1824 – 1907). Esto nos lleva a pensar que, si los factores influyentes no son cuantitativos, no pueden ser medidos, modelados ni gestionados.

Este trabajo aplica la metodología siguiente:

1. **Diagrama de Ishikawa:** Para la identificación de factores influyentes que afectan al rendimiento de neumáticos OTR.
2. **Informes estadísticos:** Para recopilar la información del caso de estudio.
3. **Modelos de regresión lineal y no lineal:** Para cuantificar el comportamiento de los factores mencionados en 1.
4. **Método de interpolación y extrapolación:** Para brindar valores superiores o inferiores a 1 (constituyendo los factores para el modelo de gestión de neumáticos OTR).

Proponer un modelo matemático sobre los factores influyentes de la vida de neumáticos permitirá identificar la gestión de su vida útil, el consumo de los neumáticos a través del tiempo y, finalmente, optimizar la gestión del neumático OTR.

FUNDAMENTOS

Existen investigaciones relacionadas con la optimización de la gestión de neumáticos OTR (desde hace 20 años aproximadamente). La mayoría de las investigaciones se han centrado en el factor de rotación de neumáticos para la gestión del acarreo, tales como 1) eficiencia en tiempo de vida de neumáticos con relación a rotación de posiciones 1 y 2 en volquetes Komatsu 930E4 de paredes (2008); 2) factores influyentes en la vida útil de llantas de camiones Komatsu 930E fuera de carretera en la mina a tajo abierto de Mora (2011); y 3) metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir los costos en SM Cerro Verde – Arequipa de Tejada (2014).

Po otro lado, la investigación de Cepillo y Jaime [2] relaciona la gestión de neumáticos OTR con el factor de diseño y cuidado de vías de acarreo. Este estudio ha contribuido significativamente en la presente investigación.

Finalmente, en los últimos años, las empresas fabricantes de neumáticos OTR han redactado manuales, guías e informes de buenas prácticas de cuidado de neumáticos para empresas mineras. Por motivos de confidencialidad, no pueden ser referenciados; sin embargo, algunos ejemplos son *Michelin Informaciones. Manual de Técnicas para Minería y Obra Civil* (2004) y *Data Book OTR – Bridgestone* (2006).

Como se puede observar, no hay antecedentes bibliográficos que contemplen investigaciones con visiones panorámicas de la problemática de gestión de neumáticos, ni del modelamiento matemático del mismo. Esta investigación, puede ser empleada como referencia para otras alternativas de solución para el tema de gestión de neumáticos OTR.

METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la presente investigación contempla, de manera general, lo siguiente:

Paso 1. Identificación de factores influyentes en la vida útil de neumáticos OTR, aplicando el diagrama de Ishikawa (1960) o causa y efecto (ver figura 1).

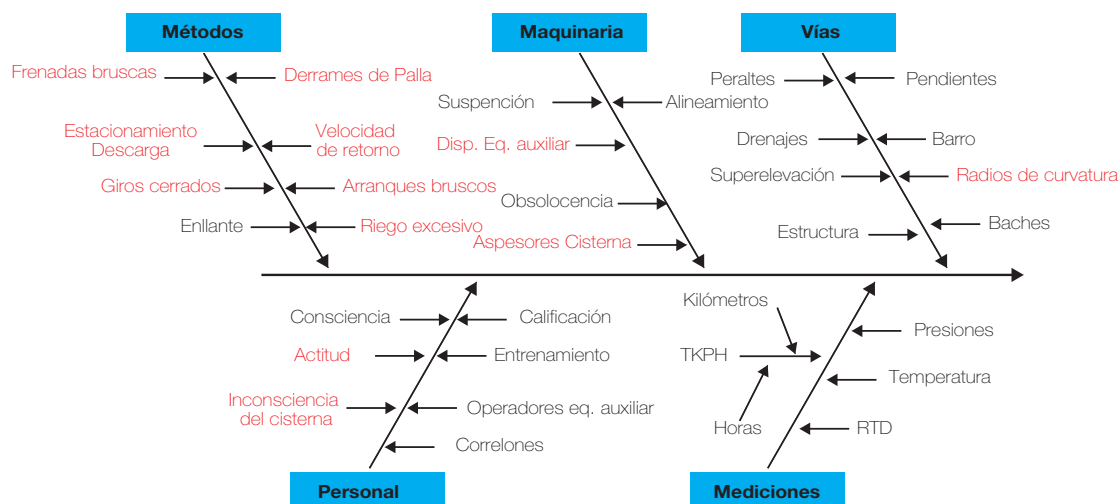


Figura 1. Diagrama de Ishikawa de factores influyentes.
Fuente: [4]

Paso 2. Elaboración de informes estadísticos para recopilar la información del caso de estudio de la mina Toquepala [4].

Aspectos generales

Se tomó en consideración los siguientes aspectos:

- Período de estudio de 6 meses.
- Neumáticos de medidas 59/80R63, 53/80R3, 40.00R57.
- El número de neumáticos OTR dañados y desechados, así como el tipo de daño, frecuencia de daños en las distintas posiciones, horas de rotación, la influencia de las rutas de acarreo, puntos de carga y descarga que más dañaron a los neumáticos, etc.

El informe estadístico del caso estudio permitió obtener la siguiente información (indispensable para los próximos pasos):

- Verificación del cumplimiento de estándar de presiones de inflado en campo, en colaboración con la empresa que brinda servicios de mantenimiento de neumáticos.
- Revisión de los rendimientos reales de las bandas de rodamiento para los distintos modelos.
- Valores de (TKPH) en el acarreo de mina en campo o mediante sistema de despacho.
- Características de los camiones para evitar cortes y daños de los neumáticos en las zonas de carga y descarga.
- Compatibilidad de equipos auxiliares en relación con las tareas asignadas para el cuidado de neumáticos OTR.
- Condiciones de diseño de las principales vías de acarreo.
- Prácticas operativas del camión que refuercen la gestión del cuidado de neumático, así como la situación cultural del cuidado de neumáticos en la gestión del acarreo.

Procesamiento de información

Al procesar la información, se tuvieron evidencias claras que el tipo de daño más común generado al neumático OTR es el daño por corte, (ver figura 2), el cual representa un 90 % del total. Además, los neumáticos que están ubicados en las posiciones traseras (3, 4, 5 y 6) reflejan un 90 % de daños, las posiciones que son «no visibles» como el caso de 5 y 6

requieren de mayor supervisión y cuidado al momento de la operación (ver figura 3).

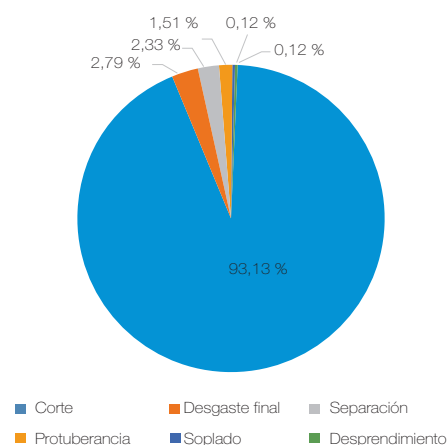


Figura 2. Porcentaje de incidencia en los daños totales por cada modalidad de daño.
Fuente: Elaboración propia.

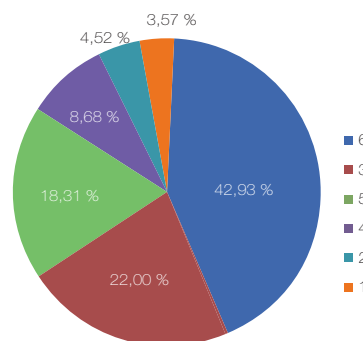


Figura 3. Porcentaje de incidencia en los neumáticos dañados por posición.
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se tienen evidencias de porcentajes altos de cortes en flanco y en banda de rodamiento (ver figura 4). En la mayoría

de los casos, los daños por flanco están relacionados con las inadecuadas prácticas operativas del camión (impactos con bermas), cortes laterales en flancos, diseños no estandarizados de anchos de vías, peraltes inadecuados para determinados diseños de curvas de vías de acarreo. El tipo de daño por banda de rodamiento es común, debido a que es el tipo de desgaste deseado. Idealmente, el deterioro parejo de la banda sería lo óptimo, sin embargo, resulta negativo cuando este se genera por debajo de la vida útil del neumático. Se ha tomado como valor estándar gastar el neumático hasta que la medida de la cocada final llegue a tener de un 15 % de la medida de cocada inicial [3].

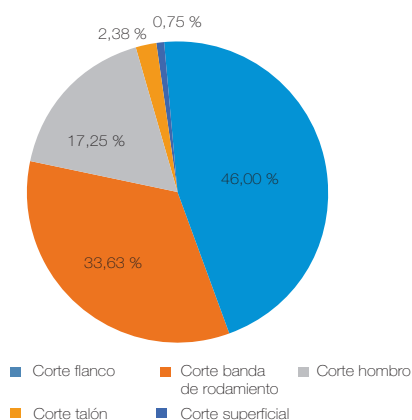


Figura 4. Porcentaje de incidencia en los neumáticos dañados por posición. Fuente: Elaboración propia.

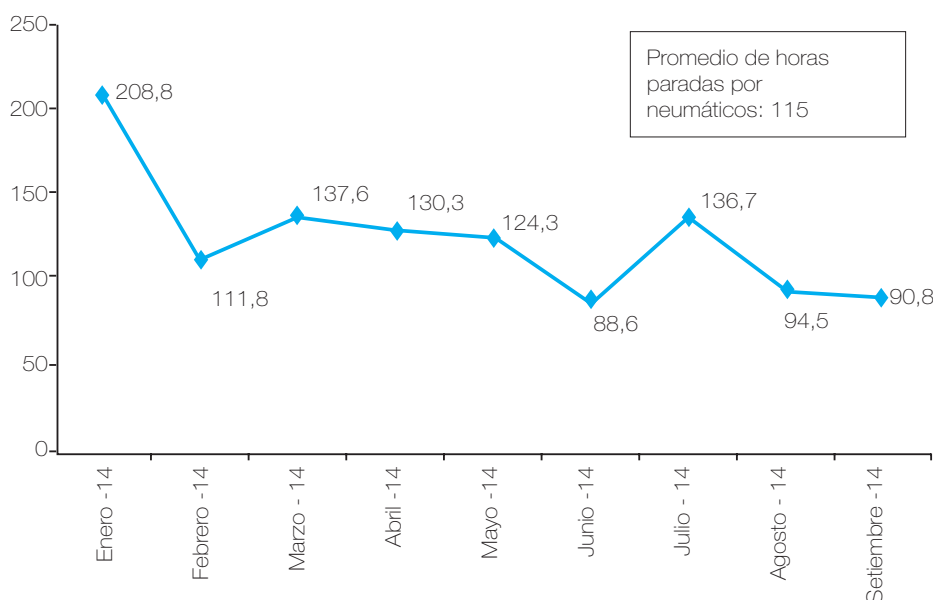


Figura 5. Horas mensuales paradas por neumáticos. Fuente: Elaboración propia.

La supervisión de la presión de inflado de neumáticos resulta importante debido a que valores por encima de la presión estándar generan desgaste prematuro en la banda de rodamiento; de igual manera, presiones más bajas del estándar producen un desgaste en los hombros y talones del neumático. Para los modelos señalados, se tienen los siguientes datos que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Presiones promedio de los equipos de acarreo

Presión	Presión fría (PSI)	Presión caliente (PSI)
Posiciones	6 posiciones	6 posiciones
40.00R57	105 – 110	125 – 130
53/80R63	100 – 105	115 – 125
59/80R63	105	115 – 125

Fuente: [6].

Es importante señalar para la presente investigación que las horas de paradas por motivo de mantenimiento de neumáticos representan un 15 % de las horas totales. En la siguiente figura, se puede apreciar lo descrito anteriormente.

Otro factor de suma importancia es la temperatura de neumático, que se relaciona, además, con el TKPH. Cuando las temperaturas son elevadas, se puede generar daños por

separación de banda a continuación, se puede apreciar los datos obtenidos:

Tabla 2
Temperaturas para medir el exterior

Temp.	No Riesgo	Riesgo	Riesgo	Peligro
°C	20 -65	70	75	Mayor a 75

Fuente: [6].

Como se había señalado antes, la gestión de las horas de rotación de los neumáticos es un factor que ha sido priorizado en las últimas investigaciones, debido a que es una alternativa de solución bastante operativa, fácilmente aplicable y medible. Para este factor se debe considerar las horas de rotación y las medidas de las cocadas (mm) en las horas de rotación. Se dispone de las tablas 3 y 4:

Tabla 3
Rotaciones y vida útil de neumáticos

Medida	h P 1 Y 2	h P 3 Y 4	h P 5 y 6
40.00 R 57	2800	4600	7680
53/80 R 63	1958	3850	5830
59/80 R 63	1328	3500	5080

h: horas - P: posición
Fuente: [3]

Tabla 4
Cocadas iniciales de neumáticos (mm)

Dimensión	Cocada inicial	
	Marca A	Marca B
40.00R57	122	124
50/90R57	133	133
53/80R63	132	138
59/80R63	144	144

Fuente: [3]

Para la temperatura interna de estabilización de la llanta, se tiene un equivalente: 40 km/h en 1 h, 20 km/h en 3 h y 25 km/h en 4 h.

El costo total en la situación de mina contempla aproximadamente 7 millones de dólares semestrales de pérdidas por motivo de desechos de neumáticos, de los cuales el 60 % se deben a daños por separación, 30 % por daños por corte y 10 % por desgaste final [4].

Esto refleja claramente que el desgaste deseado (por banda de rodamiento) solo representa 1/10 del costo total de desecho. Si bien es cierto, el desecho por corte es el más común, solo representa el 30 % del costo total por pérdidas de desecho. Esta ligera contradicción se debe al indicador «costo de remanente» que es el remanente de banda de rodamiento (en mm) en el momento del desecho. Esto significa que se puede tener más neumáticos desechados por corte, pero no necesariamente

hacen que el costo por pérdida sea el mayor, depende cuanto de banda de rodamiento se pierde por neumático. Para este caso, se ignora una posible recuperación y/o empleo de banda en un proceso de reencauche (debido a las peculiaridades operativas del caso de estudio).

Del diagrama de Ishikawa también se puede identificar que el diseño de vías influye directamente en el cuidado de neumáticos OTR; para este caso, se han obtenido los siguientes parámetros como referencia para la presente investigación:

- Velocidad de diseño: 40 km/h
- Velocidad operativa: 25 a 40 km/h
- Pendiente: De 8 a 12 %
- Peralte: 17 %
- Anchos de vías: Para el estándar 1, considerar de 20 a 25 m y, para el estándar 2, considerar de 30 a 35 m (la diferencia entre el estándar 1 y 2 depende básicamente de las dimensiones de los camiones a considerar).
- Ancho de curva: 38 m
- Radio de curvatura: 40 m

Paso 3. Modelamiento de horas y cocadas de rotación.

Según los procedimientos de buenas prácticas operativas del caso de estudio, se señala que los neumáticos de posición 1 y 2 (delanteros), después de unas determinadas horas de desgaste (objetivo de modelamiento), deben pasar a las posiciones 3 y 4 (traseras) y en las horas finales a las posiciones 5 y 6 (traseras), tomando en cuenta un remanente de banda de al menos el 15 % de medida (mm).

Para el presente artículo, se considera como ejemplo el caso del modelamiento en la etapa final de los neumáticos (posición 5 y 6). Teniendo las siguientes fórmulas:

$$Hx = Td \times (Ci - Cx) \dots (1)$$

$$Hy = Tt \times (Cx - Cy) + Hx \dots (2)$$

$$Cf = Ci - (Ci \times 85\%) \dots (3)$$

$$Hf \approx \frac{1}{Cf} \dots (4)$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Ci: Medida de cocada inicial (posiciones 1 y/o 2) en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Cx: Medida de cocada para cambio a posiciones 3 y/o 4 en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Hx: Horas para cambio a posiciones 3 y/o 4 en h.
- Cy: Medida de cocada para cambio a posiciones 5 y/o 6 en mm, variable que depende de la medida del neumático.
- Hy: Horas para cambio a posiciones 5 y/o 6 en h.
- Cf: Medida de cocada para el desecho en mm.
- Hf: Horas para desecho (h).
- Td: Tasa de desgaste en posiciones delanteras (h/mm).
- Tt: Tasa de desgaste en posiciones traseras (h/mm).

Este caso de modelamiento es muy similar para el modelamiento de las horas en las posiciones 3 y 4. El objetivo es calcular

mediante modelamiento las horas exactas a las que deben de cambiarse los neumáticos en las distintas posiciones.

A continuación, se tiene la tabla 5 que muestra el resultado del modelamiento de horas de rotación, teniendo los parámetros calculados de las horas de rotación, por consiguiente, las horas de duración de los neumáticos según su medida.

Tabla 5
Horas nominales de rotación en neumáticos

Medida	Modelamiento		
	Horas totales (1 y 2)	Horas totales (3 y 4)	Horas desde 5 y 6 hasta cumplimiento
40.00R57	2800	4600	7680
53/80R63	1968	3850	5810
59/80R63	1328	3500	5080

Fuente: Elaboración propia.

Modelo de TKPH de neumático más grande

Se tienen los siguientes parámetros de referencia [5]:

- Dimensión: 59/80R63

- Marca: Modelo A
- TKPH según catálogo: 1590 (TKPH)
- Velocidad según catálogo: 20 km/h
- Carga según catálogo: 100 toneladas
- Modelo: 360 TM
- Temperatura ambiente promedio: 15 °C
- Cantidad de ciclos: 810
- Tiempo total: 30 días
- Promedio: 10,996 km(s) 1 min, 18,7 km/h

Modelo de condiciones físicas de camión

Para este modelo, se considerará el empleo de tuberías HDP como alternativa de solución para el cuidado de neumáticos. Las tuberías HDPE son accesorios que se tienen naturalmente o se pueden incorporar en las tolvas de los camiones, con el fin de retener las rocas restantes de las sobrecargas de los equipos de carguío (palas neumáticas). En campo, se ha identificado que las rocas que caen en las partes laterales del camión pueden generar corte profundo en la banda de rodamiento debido al giro rápido en el área de carguío de parte del operador de camión.

$$NT \text{ HDPE} = NC \times 2 \text{ (1 por lado)}$$

NT: Número de tuberías

NC: Número de camiones sin tubería



Figura 6. Tubería HDPE en parte lateral de camión.
Fuente: [4]

Evaluación de la aplicación del modelo matemático en la gestión de los neumáticos OTR

Como se había señalado previamente, mediante el gráfico de Ishikawa, se tienen los siguientes factores establecido para el modelamiento:

a) Factores internos al neumático

a.1) Factor de presión de inflado de neumático (PI)

Para empezar a modelar el factor de presión de inflado del neumático (en PSI), se requiere definir la frecuencia a la que

será medido dicho factor por semana. Se ha establecido dicha frecuencia tomando en consideración las buenas prácticas realizadas por empresas contratistas sobre el mantenimiento de neumáticos en campo. Para ello, se presenta la tabla 6.

Tabla 6
Número de veces que se mide la presión por semana del neumático (FPI)

Neumático - Frecuencia normal	2
Neumático - Frecuencia regular	3
Neumático - Frecuencia óptima	4

Fuente: Elaboración propia.

Dicha frecuencia permite calcular el promedio de presión de inflado por la vida útil (PPI).

$$PPI = \frac{\sum \text{presiones medidas (PSI)}}{FPI \times \text{Vida nominal}} \dots (5)$$

Fuente: Elaboración propia.

Tomar en cuenta que, para la sumatoria de presiones medidas en PSI, este modelo restringe solo la sumatoria para todas las mediciones de presión en frío o todo en caliente. No aplica la sumatoria variada de presiones frío y caliente.

El factor para convertir la presión de inflado de frío a caliente es aproximadamente un valor de 1,2 (fórmula PIC = PIF X 1,2). Esta fórmula es resultado de experiencias y prácticas operativas en campo, tomando en cuenta que se emplea como parámetro por empresas contratistas como Neuma, entre otros [4].

Tabla 7
Relación PPI y PI

PPI	PI
0,9 PEI	0,90
0,8 PEI	0,75
0,7 PEI	0,50
1,1 PEI	0,95
1,2 PEI	0,90
1,3 PEI	0,80

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 7 ha sido creada según la metodología de interpolación y extrapolación para la asignación de valores numéricos a los equivalentes de PPI. Se ha tomado en cuenta, además, los resultados de experiencias y prácticas operativas en campo, tomando en cuenta que se emplea como parámetro por empresas contratistas [4].

La interpretación es de la siguiente manera: si el promedio de presión de inflado por la vida útil representa en algún caso el 90 % de la presión estándar de inflado (PEI), el factor de presión de inflado equivalente será 0,9, de manera sucesiva para los otros factores.

a.2) Factor de rotación de neumático (RO)

Para realizar el modelamiento, se han establecido dos variables importantes: «x» que es la tasa de desgaste de neumáticos según posición; «y» que es el incremento o decremento de vida útil. Las variables «x» y «y» se han tomado en función de las muestras (medidas y marcas de neumáticos) de campo [4].

Para este factor, se adjunta un ejemplo de modelamiento para una medida y marca específico.

Tabla 8
Modelo matemático de rotación del neumático

Modelo	59/80R63	59/80R63
Marca	A	B
Caso optimización		
Diferencia entre óptimo y nominal (h)	500	500
Diferencia entre óptimo y nominal %	9,09	9,09
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,20	0,20
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,53	0,53
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,553	0,55
Caso nominal		
Diferencia entre óptimo y nominal (h)	0	0
Diferencia entre óptimo y nominal %	0,00	0,00
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,27	0,27
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,58	0,58
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,47	0,47
Caso pérdida		
Diferencia con nominal (%)	-420	-420
Diferencia con nominal %	-7,64	-7,64
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/día)	0,37	0,37
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/día)	0,49	0,49
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,55	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9
Modelo matemático de rotación del neumático

Escenarios	
Caso óptimo (%)	9,09
Caso nominal (%)	0
Caso pérdida (%)	-7,64
Tasa de desgaste:	
Posición 1 y 2	0,20
Caso óptimo (h/mm)	0,27
Caso nominal (h/mm)	0,37
Caso perdida (h/mm)	

Fuente: Elaboración propia.

a.3) Factor TKPH (TH)

Para el caso del TKPH, existe el valor nominal que se especifica en las guías de empresas fabricantes, estas empresas consideran temperaturas relativas de neumáticos de 38 °C y condiciones que no superan los 5 km de longitud de ruta de acarreo. Por otro lado, existe el TKPH real que puede ser superior o inferior al nominal dependiendo de los factores K1 (factor que considera la longitud de ruta de acarreo) y K2 (factor temperatura).

Para este caso, a más de 5 km, el factor K1 empieza a aumentar hasta llegar a un valor de K igual a 1,23 (para 50 km de ruta de acarreo).

Para el caso del factor K2, se tiene la siguiente fórmula:

$$K_2 = \frac{V_m + (0,25x(T_a - T_r))}{V_m} \dots (6)$$

Donde [5]:

Tr: Es temperatura relativa del neumático (38°)

Ta: Temperatura ambiente

Vm: Velocidad media en km/h

Por experiencia en campo, el factor de la temperatura (fórmula anterior) altera menos que el factor por longitud por ruta de acarreo, por ende, para la presente investigación, solo se ha considerado necesario establecer la relación de K1 con el factor TKPH.

Tabla 10
Relación L (km) y valor K1

L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1
			11	6,8	1,13	21	13	1,19
			12	7,4	1,14	22	13,7	1,19
			13	8	1,15	23	14,3	1,20
			14	8,7	1,16	24	14,9	1,20
5	3,1	1,00	15	9,3	1,16	25	15,5	1,20
6	3,7	1,04	16	9,9	1,17	26	16,2	1,20
7	4,3	1,06	17	10,6	1,17	27	16,8	1,21
8	5	1,09	18	11,2	1,18	28	17,4	1,21
9	5,6	1,10	19	11,8	1,18	29	18	1,21
10	6,2	1,12	20	12,4	1,19	30	18,6	1,21

L = Longitud del ciclo en kilómetro y en millas.

Fuente: [8]

Tabla 11
Relación L (Km) y valor K1

L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1	L (km)	L (ml)	K1
21	13	1,19	31	19,3	1,21	41	25,5	1,23
22	13,7	1,19	32	19,9	1,21	42	26,1	1,23
23	14,3	1,20	33	20,5	1,22	43	26,7	1,23
24	14,9	1,20	34	21,1	1,22	44	27,3	1,23
25	15,5	1,20	35	21,7	1,22	45	28	1,23
26	16,2	1,20	36	22,4	1,22	46	28,6	1,23
27	16,8	1,21	37	23	1,22	47	29,2	1,23
28	17,4	1,21	38	23,6	1,22	48	29,8	1,23
29	18	1,21	39	24,2	1,22	49	30,4	1,23
30	18,6	1,21	40	25	1,22	50	31	1,23

Fuente: [8]

b) Factores externos al neumático

b.1) Factor de condición de vía (CV)

Los factores de condición de vía se señalan continuación:

b.1.1) Zona de carga y descarga (CD)

Las zonas de carga y descarga, dependiendo del caso de estudio, pueden relacionar el número de daños por neumático y su influencia con la pérdida de vida útil (%) que se detalla a continuación. Para este caso, se ha optado en encontrar una relación directa entre ambos parámetros según experiencias de prácticas operativas.

Tabla 12
Influencia de zona de carga y descarga

Ruta	Cálculo n.º de daños por neumático	Pérdida de vida útil porcentaje
Carga - chancadora	10 %	10 %
Carga - botadero	10 %	10 %
Depósito de stock	7 %	7 %
Ruta	Cálculo n.º de daños por neumático	Pérdida de vida útil porcentaje
Equipo de carguío mineral	30 %	30 %
Equipo de carguío desmonte	40 %	40 %
Botadero	10 %	10 %
Depósito de stock	3 %	3 %

Fuente: [3]

b.1.2) Geometría (GE)

La geometría de la vía está vinculada con el rendimiento del neumático, los problemas relacionados por este factor afectan en los impactos en los flancos, lo cual, es un tipo de daño muy común. Para esta investigación, se han considerado dos vías características de caso de estudio.

Vía de doble camino

La siguiente tabla es resultado de un cálculo de ancho total de ruta de acarreo tomando en cuenta las fórmulas de diseño de mina a tajo abierto.

Ancho de vía = (3 x Ancho) + Ancho de base de berma

Fuente: D.S 024 – 2016 – EM.

Tabla 13
Influencia de doble camino

Camión	Ancho camión (m)	Altura de neumático (m)	Ancho total ruta de acarreo (m)
220 tm	7,680	3,500	30,007
220 tm	7,240	3,500	28,687
290 tm	8,300	4,300	33,459
360 tm	9,755	4,600	38,422

Fuente: Elaboración propia.

Vía con un solo camino

La siguiente tabla es resultado de un cálculo de ancho total de ruta de acarreo tomando en cuenta las fórmulas de diseño de mina a tajo abierto.

Ancho de vía = (2 x Ancho) + Ancho de base de berma

Fuente: D.S 024 – 2016 – EM.

Tabla 14
Influencia de un solo camino

Camión	Ancho camión (m)	Altura de neumático (m)	Ancho total ruta de acarreo (m)
220 tm	7,680	3,500	22,327
220 tm	7,240	3,500	21,447
290 tm	8,300	4,300	25,159
360 tm	9,755	4,600	28,667

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15
Relación de altura de neumático y ancho de ruta

Doble carril			
Altura de neumático (m)	Ancho ruta de acarreo (m)	Relación ancho/altura (AN/AR)	Vida útil neumático (H)
3,5	30,007	0,117	7000
4,3	33,459	0,129	6000
4,6	38,422	0,120	5500

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16
Relación de altura de neumático y ancho de ruta

Un solo carril			
Altura de neumático (m)	Ancho ruta de acarreo (m)	Relación ancho/altura (AN/AL)	Vida útil neumático (H)
3,5	22,327	0,157	7000
4,3	25,159	0,171	6000
4,6	28,667	0,160	5500

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 15 y 16, si AN/AL es menor de los valores establecidos, en consecuencia, se trata de anchos con mayores dimensiones. Lo que no se debe tener son relaciones mayores a las establecidas, ya que su significado sería que se tienen anchos menores, lo cual, para ese tipo de neumáticos, causaría el desgaste de su vida útil.

b.1.3) Pendiente (PD)

Tabla 17
Velocidades KPH

Velocidad media camión	KPH
Cargado en pendiente	22
Cargado en plano	33
Vacío en pendiente	29
Vacío en plano	36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18
Relación vida de neumático vs. pendiente

% vida plano	% vida pendiente 5 %	% vida pendiente 10 %	% vida pendiente 12 %	velocidad KPH
105	95	85	81	8,05
100	90	80	76	16,09
95	85	75	71	24,14
88	78	68	64	32,19
82	72	62	58	40,23
74	64	54	50	48,28
65	55	45	40	56,33
55	45	35	31	64,37
50	40	30	26	72,42

Fuente: Elaboración propia.

Las tablas 17 y 18 se referencian de los cálculos de campo [4].

b.1.4) Peralte (PL)

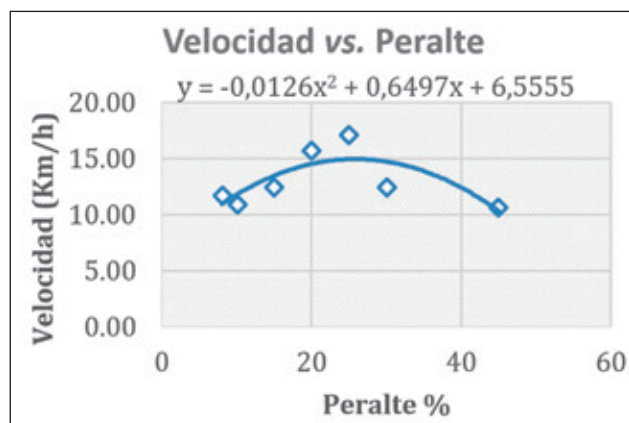


Figura 7. Relación entre velocidad y peralte.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19
Vida en función a peralte vs. porcentaje de peralte

Vida útil en función a peralte	% peralte
0,69	11,70
0,62	10,92
0,72	12,36
0,92	15,66
1,00	17,08
0,72	12,36
0,62	10,62

Fuente: Elaboración propia.

Se ha establecido, por referencias bibliográficas, la referencia entre velocidad de rodado y el peralte al cuál se realiza el transporte. Esta relación permite relacionar con la vida útil en función del peralte [4].

b.1.5) Mantenimiento y limpieza de vías (M)

Nivelación de piso de pala

- Suelo nivelado 0 % de pérdida de vida útil (1,00 de factor).
- Suelo nivelado hasta 30 % de pérdida vida útil (0,70 de factor).

Riego de vías

- Riego intermitente 0 % de pérdida de vida útil (1,00 de factor).
- Riego excesivo en ruta de acarreo 10 % de pérdida de vida útil (0,90 de factor).

Los anteriores valores son resultado de prácticas operativas en unidades mineras y caso de estudio [4].

b.1.6) Factor de flota de equipos auxiliares (AUX)

Uno de los principales factores a considerar es la compatibilidad de la cantidad de equipos auxiliares con las necesidades de soporte para la construcción y mantenimiento de vías de rutas de acarreo.

Los resultados de cálculo señalado son consecuencia del caso de estudio mencionado previamente, es importante ajustar el modelo a las necesidades de mina.

Tabla 20
Factor de vida útil de neumático: caso motoniveladora

Factor vida útil neumático	(n.º de motoniveladora) (Puntos de carguío)
0,6	0,18
0,8	0,27
0,9	0,36
1	0,45
1,2	0,55

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21
Factor de vida de neumático vs. factor tractor

Factor vida útil neumático	(n.º de tractor) (Puntos de carguío)
0,5	0,55
0,7	0,73
0,8	0,82
0,9	1,09
1	1,27
1,3	1,45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22
Factor de vida útil vs. número de rodillo

Factor vida útil neumático	(n.º rodillo) (Puntos de carguío)
0,8	0,00
1	0,18
1,3	0,36

Fuente: [4]

El factor de equipos de servicios auxiliares se calcula:

$$\frac{(v. \text{útil motoniveladora} + v. \text{útil tractor} + v. \text{útil rodillo})}{3}$$

b.2) Factor de mantenimiento de equipo (HDPE)

- Incorporación de tubos HDPE: 1,0
- Sin incorporación de tubos HDPE: 0,7

b.3) Factor influencia del operador (OP) [4]

- Operador con experiencia y cultura de cuidado de neumático: 1,25.
- Operador con regular experiencia: 1.
- Operador con regular experiencia y sin cultura de cuidado de neumáticos: 0,80 – 1.
- Operador con poca experiencia y sin cultura de cuidado de neumático: 0,75.

RESULTADOS

Factor PI

Es importante señalar que, en la presente investigación, se presentarán gráficos de funciones lineales y cuadráticas que representarán el modelamiento entre los factores influyentes vs. parámetros inherentes de la operación minera que serán especificados a medida que se detalle la metodología.

Para este caso, se tiene la figura 8 que relaciona el factor de presión de inflado vs. la presión estándar de inflado.

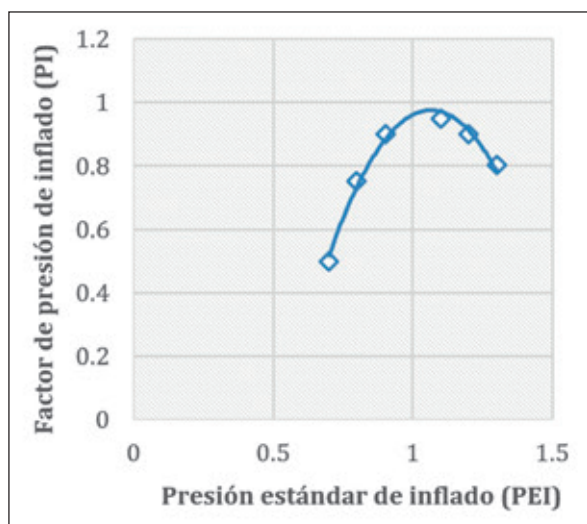


Figura 8. Relación de factor de presión de inflado vs. presión estándar de inflado.
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene los siguientes resultados

$$FPI = -3,44PPIF^2 + 7,33PPIF - 2,93 \dots (7)$$

Factor RO

En la tabla 23, se presentan los resultados del modelamiento de rotaciones de neumáticos por posiciones. Tomar en cuenta que en cada casillero se puede observar el modelo matemático lineal o cuadrático según la medida y marca.

Tabla 23
Modelo matemático de rotación del neumático

Neumático	Rotación 1 y 2 (Y)	Rotación 3 y 4 (Y)	Rotación 5 y 6 (Y)
59/80R63 Marca A	-99,9x + 28,236	-7373,9x2 + 8025,4x - 2171,7	29798x2 - 30392x + 7702,3
59/80R63 Marca B		9378,1x2 - 20025x2	
53/80R63 Marca A		- 7749x + 1597,5	+ 7589x - 3859,5
53/80R63 Marca B		10150x2 - 8391,9x + 1731	-5361,7x2 + 4505,9x - 942,76
40.00R57 Marca B		2026,4x2 - 1310,1x + 174,65	140616x2 - 123451x + 27023
40.00R57 Marca A		-8274,3x2 + 3139,4x - 282,36	-2306,3x2 + 1235,4x - 151,59

Donde:
X: Tasa de desgaste de neumáticos según posición
Y: % de incremento o decremento de vida útil
Fuente: Elaboración propia.

El factor de rotación es equivalente a «100 + Y» o «100 - Y» (dependiendo si hay incremento o decremento de vida útil). Para considerarlo en fórmula general, se debe convertir a parte decimal.

$$RO = (100 + Y) / 100; RO = (100 - Y) / 100 \dots (8)$$

Factor TH

Para el factor TH, se ha establecido un modelo de TH = 1 - (K1 - 1), debido a que, si se excede los 5 km de longitud de acarreo, ese factor K1 tendrá un intervalo de incremento que irá desde 0 a 0.23. Se ha establecido previamente, por aspectos operativos, considerar solo K1 [4].

Factor GE

Para doble carril

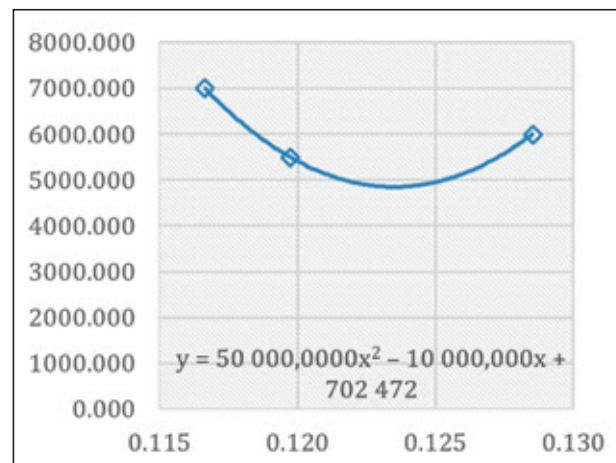


Figura 9. Relación AN/AL vs. vida útil.
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente modelo cuadrático, el cual es:

$$y = 50\,000\,000x^2 - 10\,000\,000x + 702\,472 \text{ (Doble vía)}$$

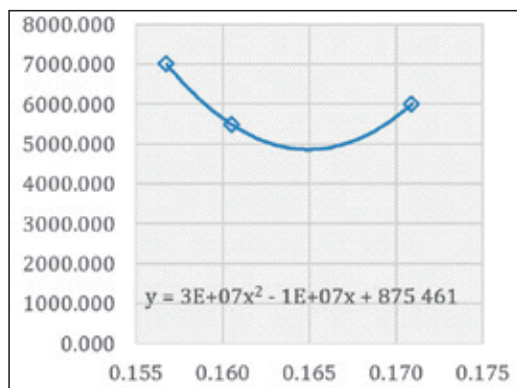


Figura 10. Relación AN/AL vs. vida útil.
Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente modelo cuadrático, el cual es el siguiente:

$$y = 30\,000\,000x^2 - 10\,000\,000x + 875\,461 \text{ (Sola vía)}$$

Factor PD

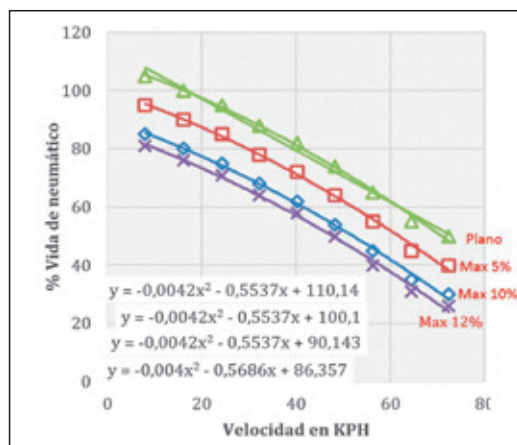


Figura 11. Relación porcentual de vida útil vs. velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

Factor PL

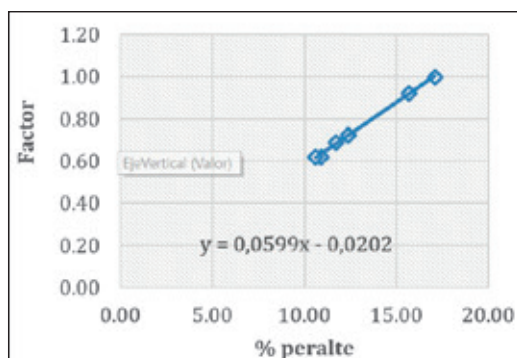


Figura 12. Factor vs. influencia de peralte.
Fuente: Elaboración propia.

Factor AUX

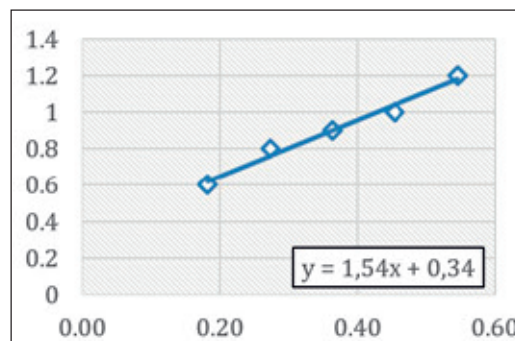


Figura 13. Número de motoniveladoras / punto de carga vs. factor de vida útil.
Fuente: Elaboración propia.

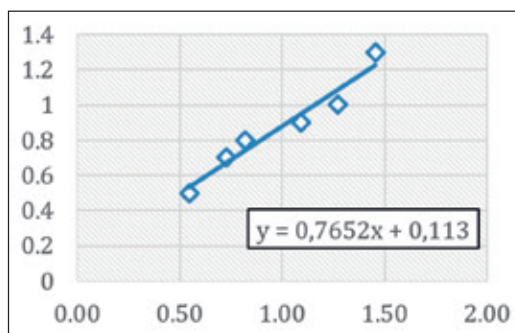


Figura 14. Número de tractores / punto de carga.
Fuente: Elaboración propia.

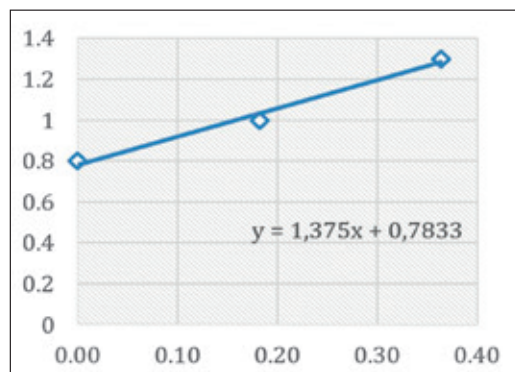


Figura 15. Número de rodillos / puntos de carga.
Fuente: Elaboración propia.

Fórmula de aplicación

Una vez presentados los resultados, se tiene la fórmula final.

Factores internos (I)

$$I = \frac{PI + RO + TH}{3}$$

Factores externos (E)

$$E = \frac{CD + GE + PD + PL + M + AUX + HDPE + OP}{8}$$

Modelamiento de gestión de neumáticos: (I x E)

Tabla 24
Calificación de gestión en función del valor I x E

Calificación	Valor (I x E)
Gestión óptima	1,20 – 1,29
Gestión buena	1,10 – 1,19
Gestión regular	1,00
Gestión deficiente	0,90 – 0,99
Gestión muy deficiente	0,80 – 0,89

Fuente: Elaboración propia.

Para la aplicación en caso de estudio, se tienen los siguientes datos y resultados:

Tabla 25
Parámetros y factores de modelamiento de caso de estudio

Parámetros y factores	Valores
Medida	59/80R63
Presión (PSI)	105
Temperatura (C°)	20 – 65
Horas de rotación 1 y 2	1328
Horas de rotación 3 y 4	3500
Horas de rotación 5 y 6	5080
Cocada inicial (mm)	144
FPI (Frecuencia normal)	2
Presión de inflado 1	110
Presión de inflado 2	104
Vida nominal (h)	5080
PPI (promedio de presión de inflado)	107
PI (Factor de presión de inflado)	0,97
Tasa de desgaste 1 y 2 (mm/ día)	0,27
Tasa de desgaste 3 y 4 (mm/ día)	0,58
Tasa de desgaste 5 y 6 (mm/día)	0,47
% de incremento de vida útil	1,26
% de incremento de vida útil	2,45
% de incremento de vida útil	0,44
RO (factor de rotación de neumático)	1,01
Longitud máxima de ruta (Km)	8
K1 Factor influyente en TKPH	1,09
TH (factor TKPH)	1,09
Influencia zona de carga y descarga	-0,1
CD (factor zona carga y descarga)	0,9
Camión de 360, ancho total (m)	38,422
Relación (AN/AL)	0,16
GE (factor de Geometría)	0,84
Velocidad máxima (KPH)	16
Pendiente (%)	12
PD (factor pendiente)	0,76
Peralte	17
PL (factor peralte)	1
Suelo nivelado y riego intermitente	1
M (factor mantenimiento y limpieza de vías)	1
Factor de n.º de motoniveladora / punto de carguío	0,36
Factor de n.º de tractor / punto de carguío	1,09
Factor de n.º de rodillo / punto de carguío	0,18
Factor vida útil por motoniveladora	0,9
Factor vida útil por tractor	0,9
Factor vida útil por rodillo	1
AUX (factor de flota de equipos auxiliares)	0,93
HDPE (factor mantenimiento de equipo)	0,7
OP (factor influencia del operador)	0,9
I (factores internos)	1,02
E (factores externos)	0,88
modelo de gestión de neumáticos	0,90

Fuente: Elaboración propia.

Se tiene el siguiente resultado final de la gestión:

Tabla 26
Gestión deficiente con oportunidades de mejora

Calificación	Valor (I x E)
Gestión óptima	1,20 – 1,29
Gestión buena	1,10 – 1,19
Gestión regular	1
Gestión deficiente	0,90 – 0,99
Gestión muy deficiente	0,80 – 0,89

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Se ha comprobado que el diagrama de Ishikawa permite identificar los factores influyentes de un problema, como es el caso de la gestión de neumáticos OTR.
- Se ha podido justificar, en el presente artículo, la importancia de un modelo de gestión de neumáticos OTR para la optimización del acarreo en mina.
- La aplicación del modelamiento permitió aplicar modelos matemáticos de regresión lineal y cuadrático.
- Se ha desarrollado el modelamiento de factores internos y externos, a su vez, se aplicó al caso de estudio teniendo valores de 1,02 y 0,88 respectivamente.
- El modelo de gestión de neumáticos está representado por el producto de los factores internos y externos, teniendo para el caso de aplicación un valor de 0,90 como gestión deficiente con oportunidad de mejoras según la tabla 26.
- La aplicación de un modelo en la gestión de neumáticos OTR, permite hacer visible las oportunidades de mejora, así como hacer una evaluación cuantitativa y cualitativa.

REFERENCIAS

- [1] Chávez, J. (2013). Gestión de neumáticos OTR. *Seminario de neumáticos gigantes en unidad minera de Cerro Verde. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.*
- [2] Chepillo, N. y Jaime, A. (2003) *Mejoramiento de caminos y accesos en mina escondida* [Tesis de grado], Universidad de Santiago de Chile.
- [3] Delgado, R. (2014) Estadística de reporte y daños de neumáticos OTR 2014 enero a junio. Mina Toquepala.
- [4] Delgado, R. (2014) *Estudio de factores influyentes en la vida útil de neumáticos para una gestión estratégica en*

mina a tajo abierto de cobre 2014. [Tesis de grado], Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

- [5]** Michelin. (2013) *Análisis de TKPH camión 67*. Informe de Michelin.
- [6]** Michelin Informaciones (s. a.). *Manual de Técnicas para Minería y Obra Civil*.
- [7]** Mora, A. (2011) *Factores influyentes en la vida útil de llantas de camiones Komatsu 930E fuera de carretera en la mina a tajo abierto* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- [8]** Paredes, C. (2008) *Eficiencia en tiempo de vida de neumáticos con relación a rotación de posiciones 01y 02 en Volquetes Komatsu 930E4* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima. Recuperado de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/859/1/paredes_sc.pdf
- [9]** Tafur, R. (2005) *La Tesis Universitaria*. Lima: Mantaro.
- [10]** Tejada, Á. (2014) *Metodología del cambio de posiciones 1 y 6 de neumáticos gigantes 793-D, para incrementar la vida útil y reducir costos en SM Cerro Verde – Arequipa* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

ACERCA DEL AUTOR

Roberto Delgado Alemán

Ingeniero de minas de la Universidad Nacional de San Agustín. Egresado de la maestría en Gestión en Seguridad, Salud y Medio Ambiente en Minería por la Universidad Nacional de Huancavelica y Cámara Minera del Perú. Diplomatura en Minería Superficial: Planeamiento, Diseño y Optimización de Operaciones unitarias por Cámara Minera Del Perú. Ha participado en el curso Comité Paritario de Seguridad y Salud para la prevención de Accidentes APA Chile. Posee experiencia en la supervisión y la gestión de despacho en operaciones mineras a tajo abierto. Asimismo, ha supervisado la seguridad y la salud ocupacional en el entorno minero e industrial; es catedrático en Tecsup Sede Sur.

 rdelgadoa@tecsup.edu.pe

 rodeal@hotmail.es

Recibido: 18-06-19 Revisado: 20-07-29 Aceptado: 24-07-19



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0 Internacional.