

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

ANÁLISIS DE LA CONGESTIÓN DE CAMIONES
EN UNA OPERACIÓN A CIELO ABIERTO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

JAVIER EDUARDO MORALES CÁRDENAS

PROFESOR GUÍA:
ANTONIO COUBLE CERVIÑO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
HANS GÖPFERT HIELBIG
CRISTÍAN CORTÉS CARRILLO

SANTIAGO DE CHILE

ENERO 2011

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo analizar el efecto que tendría la congestión de camiones en una operación minera a cielo abierto.

Dadas las tasas de producción que se planifican actualmente en la minería a cielo abierto, se requiere una gran cantidad de camiones, mas no se considera la interacción que estos equipos tendrán ni el efecto de congestión que se pueda producir.

En la investigación se realiza la simulación de una mina actualmente en operación, con el objetivo de validar el modelo de microsimulación a utilizar y se estima la desviación estándar del tiempo empleado en cada uno de los procesos.

La validación considera los principales aspectos que influyen en el ciclo de un camión, es decir, tiempos de carga, descarga y de viaje, además de restricciones físicas que se puedan presentar, tales como un número máximo de camiones en un punto de carga o descarga, número de vías por ruta, velocidades máximas permitidas; así como también las características propias de los camiones utilizados, tales como, aceleración, capacidad de carga y tamaño del equipo.

Con el modelo ya calibrado se realiza una serie de pruebas para el caso de la mina Antamina, ubicada en Perú, donde se necesita estimar la capacidad máxima que tiene el sistema, al operar un conjunto de chancadores de mineral y de estéril en el sector llamado valle Antamina. Para este análisis se realizan diferentes pruebas en las cuales se varía el flujo de camiones que transportan mineral y estéril.

La planificación de Antamina tiene considerado para el año 2014 el envío de 45Mt al chancador de mineral y de 76Mt a los chancadores de estéril.

Una vez realizadas las simulaciones, se logra establecer que el límite de tonelaje, para una geometría establecida, que puede procesar el chancador de mineral es de 52Mt por año, que corresponde a aumentar el envío de camiones en un 20% respecto al caso base. A partir de los siguientes incrementos en el flujo hacia el chancador de mineral, se observan pérdidas en el tiempo que el camión se encuentra en la zona de chancado. Por su parte, los chancadores de estéril pueden procesar 92Mt por año, lo cual se consigue aumentando un 30% el número de camiones enviados respecto al caso base. Un procesamiento mayor afecta las descargas que se tienen en el chancado de mineral.

Es muy importante considerar la interacción que presenten los camiones, ya que ésta puede llegar a ser un tiempo no menor en el tiempo total del ciclo de un camión y si esta situación se hace constante durante la vida de la mina, se deberá buscar alternativas de diseño o de transporte de mineral que ayuden a disminuir estos tiempo perdidos por congestión.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the effect of truck's congestion in open pit mining operations.

Given the production rates currently being planned in open pit mining, it is considered that a large number of trucks is required to meet these rates, however it is not taken into account the interaction between one truck with each other nor the effect in the congestion produced by the operation.

In order to validate this model, real data scenarios are considered. To accomplish this objective it is considered the calculated standard deviation of the time taken to complete each one of the cycles for a given truck.

The simulation will consider the main aspects influencing the cycle of a truck, i.e., loading, unloading and travel times in addition to possible physical constraints such as a maximum number of trucks in a loading or unloading point, number of routes by road, speed limits, and also characteristics of trucks, such as acceleration, payload, and dimensions of the equipment.

With the calibrated model there will be performed a series of simulations will be applied to the case of the Antamina mine located in Peru, where it is necessary to estimate the system's maximum capacity required to operate a sterile crushing facility in the area called Antamina valley. For this analysis tests are conducted varying the flow of trucks carrying ore and waste.

Antamina is has considered a mine plan by the year 2014 considering sending 45 [Mt] ore to the crusher and 76 [Mt] to the sterile crushers.

Once the simulations are completed, it is established that the limit tonnage, for a given geometry set, is around 52 [Mtpa], which represents a 20% increase compared to the base case. Once the flow to the crusher is increased, it is observed a lost in operational efficiency (reflected in a increase of the cycle's time) this is observed in the nearby crusher area. On the other hand, the crushers of sterile can process 92 [Mtpa], which is achieved by increasing by 30% the number of trucks sent (compared to the base case). An increase in the flow of sterile has an impact in the dumps of ore to the mineral crusher.

It is very important to consider the interaction between trucks, since this can be a significant part of the total cycle time of a truck, if it is observed that the previous situation is repeated through the life of mine, two solutions must be considered, the first one of them involves mine design and the second one involves a transport alternative in order to reduce the operational time loses.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por haberme entregado todo y más de lo necesario para poder desarrollar de buena forma todos mis estudios. En especial a mi padre que me sirvió de ejemplo de estudio, a mi madre que me apoyo en todo momento, a mi hermano que me ayudó con la carrera y también a mi hermana que más de alguna vez me tuvo que soportar trabajando por la noche.

A mi polola Laeticia que me soportó durante todo el tiempo que duró la memoria.

A mis compañeros de carrera, que en todo momento que necesite su ayuda me la brindaron, especialmente a Cristián Pérez y Javier Dharmawidjaja con quienes tuve que pasar varias veces en las noches estudiando.

A la gente de NCL que me ayudó y que compartió conmigo estos meses que duro el desarrollo de esta memoria, especialmente a Antonio Martínez que me trajo a acá, a Antonio Couble por su disposición y conocimiento que aportó como profesor guía, también a Alvaro Azolas, Cristián Salas, Guillermo Hohmann, Cristián Opazo, Ignacio Gálvez y al Perro.

A Hans Göpfert por su paciencia y dedicación en la corrección de la memoria.

A Urbano Proyectos que me proporcionó las facilidades para desarrollar bajo su plataforma esta memoria, en especial a Oscar Salazar y Claudio Norambuena por su buen ánimo para realizar las tareas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción.....	1
1.1. Origen del estudio.....	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivos generales	1
1.2.2. Objetivos específicos.....	1
1.3. Alcances	2
1.4. Metodología de trabajo.....	2
2. Revisión bibliográfica.....	3
2.1. Modelos macroscópicos	3
2.2. Modelos microscópicos	3
2.2.1. Autómata celular	3
2.2.2. Modelo Nagel-Schreckenberg (Na-Sch) (1992).....	4
2.2.3. Modelo Knospe, Santen, Schanschneider, Schreckenberg (K-S-S-S) (2000).....	4
2.3. Modelos mesoscópicos	6
2.4. Modelos mineros determinísticos	6
2.4.1. Tiempo de ciclo de camión	6
2.4.2. Número de camiones por pala	7
2.4. Modelos mineros probabilísticos	7
3. Datos de entrada	9
3.1. Datos del tiempo de ciclo	9
3.2. Características físicas de la mina	9
3.3. Características del camión.....	9
4. Modelo de calibración	10
4.1. Tiempos de ciclo	10
4.1.1. Tiempo de ciclo total.....	10
4.1.2. Tiempos de viaje.....	10
4.1.3. Desviaciones estándar de los procesos.....	11
4.2. Características físicas de la mina	11
4.3. Características del camión.....	11
5. Simulación del modelo de calibración.....	13

5.1. Tiempos por ruta	13
5.2. Validación del sistema de modelación	13
6. Pruebas experimentales en el modelo de simulación.....	15
6.1. Pruebas de rutas congestionadas individualmente.....	16
6.1.1. Prueba de congestión de la Ruta 1	16
6.1.2. Prueba de congestión de la Ruta 2.....	17
6.1.3. Prueba de congestión de la Ruta 3.....	17
6.2. Pruebas de rutas congestionadas interactuando	18
6.2.1. Prueba de congestión de la Ruta 4.....	19
6.2.2. Prueba de congestión de la Ruta 5.....	20
7. Caso Antamina	24
7.1. Descripción de la faena	24
7.2. Problemática de la congestión en Antamina	24
7.3. Identificación de la zona.....	24
7.4. Identificación de los puntos de entrada, descarga y rutas.	24
7.6. Casos simulados.....	29
7.6.1. Variando flujo a chancador de estéril.....	29
7.6.2. Variando flujo a chancador de mineral	30
7.7. Características de los camiones utilizados en la simulación	30
8. Resultados de la simulación en el Valle Antamina.....	31
8.1. Resultados de variar el flujo al chancador de estéril	31
8.1.1. Datos recopilados de las simulaciones.....	31
8.1.2. Gráficos obtenidos de los datos	32
8.2. Resultados de variar el flujo al chancador de mineral.....	32
8.2.1. Datos recopilados de las simulaciones.....	32
8.2.2. Gráficos obtenidos de los datos	33
9. Análisis de resultados del caso Valle Antamina	34
9.1. Análisis de variar el flujo al chancador de estéril	34
9.2. Análisis de variar el flujo al chancador de mineral	35
10. Conclusiones	36
10.1. Conclusiones generales	36
10.2. Conclusiones específicas.....	36

Referencias	37
Anexo A.....	38
Modelo de calibración	38
Anexos B.....	41
Anexo C	52
Anexo D.....	56
Anexo E	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Diagrama de procesos de estándar de una mina a cielo abierto.	9
Ilustración 2. Relación entre tiempos promedios y desviación estándar.	10
Ilustración 3. Tiempos de viaje estimados a partir de las velocidades y distancias medias.	11
Ilustración 4. Datos de la Pala 2 en la Ruta 1.	16
Ilustración 5. Datos del Pique 1 en la Ruta 1.	16
Ilustración 6. Datos de la Pala 1 en la Ruta 2.	17
Ilustración 7. Datos del Pique 1 en la Ruta 2.	17
Ilustración 8. Datos del Cargador 1 en la Ruta 3.	18
Ilustración 9. Datos del Pique 1 en la Ruta 3.	18
Ilustración 10. Datos de la Pala 2 en la Ruta 4.	19
Ilustración 11. Datos de la Pala 1 en la Ruta 4.	19
Ilustración 12. Datos del Pique 1 en la Ruta 4 para camiones venidos de la Pala 2.	20
Ilustración 13. Datos del Pique 1 en la Ruta 4 para camiones venidos de la Pala 1.	20
Ilustración 14. Datos de la Pala 2 en la Ruta 5.	21
Ilustración 15. Datos de la Pala 1 en la Ruta 5.	21
Ilustración 16. Datos del Cargador en la Ruta 5.	22
Ilustración 17. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos de la Pala 2.	22
Ilustración 18. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos de la Pala 1.	23
Ilustración 19. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos del Cargador.	23
Ilustración 20. Rutas de salida hacia el valle Antamina a partir del año 2014.	24
Ilustración 21. Ruta 1, Valle Antamina.	26
Ilustración 22. Ruta 2, Valle Antamina.	26
Ilustración 23. Ruta 3, Valle Antamina.	27
Ilustración 24. Ruta 7, Valle Antamina.	27
Ilustración 25. Ruta 8, Valle Antamina.	28
Ilustración 26. Ruta 9, Valle Antamina.	28
Ilustración 27. Ruta 10, Valle Antamina.	29
Ilustración 28. Variación del flujo a los chancadores de estéril.	32
Ilustración 29. Variación del flujo al chancador de mineral.	33
Ilustración 30. Plano de ubicación de las entidades.	38
Ilustración 31. Rutas utilizadas para la simulación.	40
Ilustración 32. Análisis de sensibilidad de Ruta 1.	52
Ilustración 33. Análisis de sensibilidad de Ruta 2.	52
Ilustración 34. Análisis de sensibilidad de Ruta 3.	53
Ilustración 35. Análisis de sensibilidad de Ruta 7.	53
Ilustración 36. Análisis de sensibilidad de Ruta 8.	54
Ilustración 37. Análisis de sensibilidad de Ruta 9.	54
Ilustración 38. Análisis de sensibilidad de Ruta 10.	55
Ilustración 39. Análisis de sensibilidad de Ruta 1.	64
Ilustración 40. Análisis de sensibilidad de Ruta 2.	64

Ilustración 41. Análisis de sensibilidad de Ruta 3.	65
Ilustración 42. Análisis de sensibilidad de Ruta 7.	65
Ilustración 43. Análisis de sensibilidad de Ruta 8.	66
Ilustración 44. Análisis de sensibilidad de Ruta 9.	66
Ilustración 45. Análisis de sensibilidad de Ruta 10.	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tiempos de ciclo.....	11
Tabla 2. Velocidad de camión Komatsu 930E.....	12
Tabla 3. Número de rutas.....	13
Tabla 4. Distancias de viaje.....	13
Tabla 5. Tiempos obtenidos a partir de la simulación.....	13
Tabla 6. Comparación de datos reales con simulados.....	14
Tabla 7. Rutas a congestionar.....	15
Tabla 8. Número de camiones por pruebas individuales.....	15
Tabla 9. Número de camiones por prueba con interacción.....	15
Tabla 10. Denominación de rutas interactuando.....	19
Tabla 11. Origen y destino de las rutas.....	25
Tabla 12. Flujo de camiones variando el flujo al chancador de estéril.....	29
Tabla 13. Flujo de camiones variando el flujo al chancador de mineral.....	30
Tabla 14. Velocidad de camión Caterpillar 793F.....	30
Tabla 15. Tabla resumen de resultados de las simulaciones.....	31
Tabla 16. Tabla resumen de resultados de las simulaciones.....	32
Tabla 17. Análisis de tpa para diferentes flujos.....	34
Tabla 18. Análisis de tpa para diferentes flujos.....	35
Tabla 19. Detalle de los sectores.....	39
Tabla 20. Resultados de la simulación para el caso base.....	41
Tabla 21. Resultados de la simulación para un envío 50% menor al chancador de estéril.....	42
Tabla 22. Resultados de la simulación para un envío 30% menor al chancador de estéril.....	43
Tabla 23. Resultados de la simulación para un envío 20% menor al chancador de estéril.....	44
Tabla 24. Resultados de la simulación para un envío 10% menor al chancador de estéril.....	45
Tabla 25. Resultados de la simulación para un envío 10% mayor al chancador de estéril.....	46
Tabla 26. Resultados de la simulación para un envío 20% mayor al chancador de estéril.....	47
Tabla 27. Resultados de la simulación para un envío 30% mayor al chancador de estéril.....	48
Tabla 28. Resultados de la simulación para un envío 50% mayor al chancador de estéril.....	49
Tabla 29. Resultados de la simulación para un envío 70% mayor al chancador de estéril.....	50
Tabla 30. Resultados de la simulación para un envío 100% mayor al chancador de estéril.....	51
Tabla 31. Resultados de la simulación para un envío 50% menor al chancador de mineral.....	56
Tabla 32. Resultados de la simulación para un envío 30% menor al chancador de mineral.....	57
Tabla 33. Resultados de la simulación para un envío 20% menor al chancador de mineral.....	58
Tabla 34. Resultados de la simulación para un envío 10% menor al chancador de mineral.....	59
Tabla 35. Resultados de la simulación para un envío 10% mayor al chancador de mineral.....	60
Tabla 36. Resultados de la simulación para un envío 20% mayor al chancador de mineral.....	61
Tabla 37. Resultados de la simulación para un envío 30% mayor al chancador de mineral.....	62
Tabla 38. Resultados de la simulación para un envío 50% mayor al chancador de mineral.....	63

1. Introducción

1.1. Origen del estudio

La congestión ha sido un tema ampliamente estudiado por el ámbito de la ingeniería civil, mediante el uso de diferentes modelos, tales como:

- Modelos macroscópicos, en donde se busca relacionar la velocidad de los vehículos, el flujo vehicular y la densidad de tráfico.
- Modelos microscópicos, los cuales buscan describir la interacción que presentan las entidades individuales involucradas en el sistema a estudiar.

Para el ámbito minero dichos modelos no son considerados para el dimensionamiento de flotas y se utiliza el modelo en donde se busca saturar la pala con el número de camiones seleccionados, en los cuales se consideran los tiempos de los diferentes procesos involucrados, las capacidades de las unidades de carguío y transporte, la distancia de viaje, la velocidad de los diferentes estados, la disponibilidad y el factor operacional que se tenga.

Ya con el avance de la tecnología ha surgido la necesidad de incluir dichos parámetros para estimar el impacto que tendrá el considerar la congestión en una operación minera.

El presente caso de estudio se realizará en la mina Antamina, ubicada en Perú. Este caso es de alto interés ya que se tiene una gran cantidad de camiones operando en un espacio reducido, lo cual puede repercutir en una alta interacción entre camiones, impactando en los tiempos de ciclo.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

- Analizar el impacto que tiene la congestión de camiones en una mina a cielo abierto.
- Identificar las principales zonas de congestión.

1.2.2. Objetivos específicos

- Modelar el caso de Antamina y determinar dónde se producen los mayores problemas de congestión.
- Estimar flujos de camiones máximos por rutas.
- Proponer un modelo de dimensionamiento de flota que castigue las rutas que operan sobre el límite de congestión encontrado.
- Realizar un análisis de sensibilidad con respecto al número de camiones llegando a un punto de descarga con el objetivo de encontrar el número máximo de camiones que puede estar arribando a los destinos dados.

1.3. Alcances

Los alcances de este trabajo corresponden a una evaluación técnica de los diferentes escenarios creados a partir de una simulación en donde se puedan observar los problemas de congestión que se tendrán en el caso de Antamina, comparando los distintos escenarios posibles entre sí, con el objetivo de estimar la cantidad de tiempo perdido al estar operando bajo condiciones de alto tráfico de camiones.

1.4. Metodología de trabajo

Para alcanzar los objetivos propuestos se aplicó la siguiente metodología de trabajo:

- 1) Revisión exhaustiva del estado del arte con respecto a modelos de tráfico vial.
- 2) Buscar los principales parámetros que influyen en el ciclo de un camión, en una operación minera a cielo abierto, para ser utilizados como datos de entrada en la simulación.
- 3) Calibración del modelo a utilizar, esto se realizará mediante la modelación de una mina que se encuentre en operaciones.
- 4) Simulación de diferentes escenarios en el modelo previamente calibrado.
- 5) Identificar zonas donde se produce la congestión.
- 6) Simulación de la situación futura planificada para Antamina.
- 7) Encontrar parámetros de flujos máximos por rutas de la mina.
- 8) Análisis de sensibilidad de los flujos máximos permitidos por rutas.
- 9) Análisis de los resultados obtenidos.
- 10) Conclusiones respecto del trabajo realizado y recomendaciones para enfrentar el problema de congestión.

2. Revisión bibliográfica

Existen varias aproximaciones matemáticas para modelar el flujo de tráfico vehicular. Existen distintos enfoques para modelar dicho fenómeno.

2.1. Modelos macroscópicos

Busca relacionar la velocidad de los vehículos, flujo vehicular y densidad de tráfico, en esta área se destacan Dirk Helbing, M. Treiber y L. A. Pipes¹.

2.2. Modelos microscópicos

Buscan describir entidades individuales discretas que interactúan entre ellas, dentro de los principales investigadores se puede encontrar a Kai Nagel, Michael Schreckenberg, M. Brando, P. G. Gipps, M. Fukui y Y. Ishibashi.

2.2.1. Autómata celular

Es el precursor de algunos modelos de flujo de tráfico ya que permite modelar un gran número de componentes homogéneos que puedan interactuar localmente entre sí.

- von Neumann (1966) *The Theory of Self-reproducing Automata*, ed. Univ. Of Illinois Press, Urbana, IL: Se utilizan los cuatro vecinos mas cercanos a la célula para determinar el comportamiento de ésta, dichos vecinos son arriba, abajo, izquierda y derecha, se conoce como la vecindad de von Neumann
- Gardner, M. (1970) *Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life"*, Scientific American: Se incorporan los cuatro vecinos diagonales (vecindad de Moore) a la vecindad de von Neumann. Este año John Horton Conway dio a conocer: el Juego de la vida (Life) que considera los 8 vecinos previamente nombrados y mediante las siguientes reglas :
 - *Nacimiento*: se reemplaza una célula muerta por una viva si dicha célula tiene exactamente 3 vecinos vivos.
 - *Muerte*: se reemplaza una célula viva por una muerta si dicha célula no tiene más de 1 vecino vivo (muerte por aislamiento) o si tiene más de 3 vecinos vivos (muerte por sobrepoblación).
 - *Supervivencia*: una célula viva permanecerá en ese estado si tiene 2 o 3 vecinos vivos.
- Wolfram (1986) *Theory and Application of Cellular Automata*, World Scientific, Singapur: El autómata celular muestra diferentes comportamientos para los diferentes estados iniciales que se le puedan entregar, según esto un autómata celular pertenece a una de las siguientes clases:
 - **Clase I**. La evolución lleva a una configuración estable y homogénea, es decir, todas las células terminan por llegar al mismo valor.
 - **Clase II**. La evolución lleva a un conjunto de estructuras simples que son estables o periódicas.

- **Clase III.** La evolución lleva a un patrón caótico.
- **Clase IV.** La evolución lleva a estructuras aisladas que muestran un comportamiento complejo (es decir, ni completamente caótico, ni completamente ordenado, sino en la línea entre uno y otro, este suele ser el tipo de comportamiento más interesante que un sistema dinámico puede presentar).

2.2.2. Modelo Nagel-Schreckenberg (Na-Sch) (1992)

Es un modelo de tránsito vehicular con un autómata celular probabilístico, en donde cada célula es un vehículo en movimiento o un espacio vacío de la avenida en donde se encuentran dichos vehículos.

Con este modelo se pueden modelar autopistas de un carril, y el cual considera los siguientes parámetros:

- Cada vehículo tiene una posición x , en la autopista.
- Cada vehículo tiene una velocidad v asociada.
- v_{max} , es la velocidad máxima que puede alcanzar un vehículo.
- p , es la probabilidad con que un vehículo reduce su velocidad aleatoriamente.
- b se conoce como brecha; es la distancia entre vehículos.

Para este modelo se deben seguir las siguientes reglas:

- Regla 1. Si el vehículo no ha llegado a su velocidad máxima, éste debe acelerar.
- Regla 2. La velocidad será el mínimo entre la velocidad calculada para la regla 1 y la brecha con el predecesor.
- Regla 3. Frenado aleatorio.
- Regla 4. Movimiento, la posición del vehículo se actualiza con la nueva velocidad.

2.2.3. Modelo Knospe, Santen, Schanschneider, Schreckenberg (K-S-S-S) (2000)

Es un modelo basado en Na-Sch. Es un modelo más complejo que agrega consideraciones tales como la estrategia para conducir que se basa en cuatro aspectos:

- Para brechas largas, un vehículo irá lo más rápido que pueda, teniendo como máximo su límite.
- Para brechas intermedias, un vehículo reaccionará a los cambios de velocidad de su predecesor, esto a través de sus luces de freno, que se encienden cuando un vehículo reduce su velocidad por causa de pisar el pedal del freno del vehículo, y se apagan cuando este pedal se suelta.
- Para brechas cortas, un vehículo se mantendrá a una distancia segura para evitar colisiones (siguiendo un esquema muy similar al del modelo Na-Sch).
- Si el vehículo se encuentra en reposo (su velocidad es 0), e inmediatamente después de eventos de frenado, su tiempo de reacción para comenzar a acelerar puede verse alterado con cierta probabilidad.

Por otra parte, a diferencia del modelo Na-Sch donde los vehículos ocupan 1 única célula, en el modelo K-S-S-S todos los vehículos ocupan 5 celdas, es decir, la discretización del espacio es mucho más fina.

Se tienen para modelar los siguientes parámetros:

- Igual que en el modelo Na-Sch, cada vehículo tiene asociada una posición x en la autopista. Al ser un AC un espacio discreto, cada célula equivale a una parte de un vehículo o a una célula vacía. Por convención, la posición es creciente, a partir de un índice 0. Se puede denotar la posición de cada célula para un vehículo dado k como k_1, k_2, k_3, k_4 y k_5
- Cada vehículo tiene una velocidad v asociada, que es un valor entero.
- v_{max} es la máxima velocidad que puede alcanzar cualquiera de los vehículos.
- Cada vehículo además indica el estado de sus luces de freno a través de b_k , un valor booleano para el vehículo k . Cuando b_k es *verdadero*, las luces están encendidas. Cuando es *falso*, están apagadas.
- p es la probabilidad de que un vehículo reduzca su velocidad aleatoriamente. En el modelo K-S-S-S, p puede tomar uno de tres valores, a saber:
 1. p_0 si el vehículo se encuentra detenido
 2. p_b si las luces de freno del predecesor están encendidas y el predecesor se encuentra además dentro del horizonte de interacción del vehículo.
 3. p_d en cualquier otro caso
- b se conoce como la *brecha*, que es la distancia en células que separa a un vehículo de su predecesor (el vehículo inmediatamente adelante de él). En este caso, puesto que los vehículos se componen de más de 1 célula, la brecha está definida por el número de células vacías entre la parte frontal del vehículo y la parte trasera de su predecesor.
- El concepto de "horizonte de interacción" conlleva mayor precisión matemática a la explicada anteriormente, y se relaciona con la velocidad del vehículo sucesor, su brecha (de acuerdo al modelo Na-Sch) con su predecesor y un parámetro del modelo conocido simplemente como h , el parámetro de la interacción.

Como en el modelo Na-Sch, debe aclararse que la velocidad está dada en *células por unidad de tiempo*, y al tratarse de un AC discreto, el tiempo corre en unidades, por lo que hablar de una velocidad n equivale a decir que un vehículo se moverá n células hacia adelante en un paso de tiempo.

Las reglas a las que se atiene el modelo son:

- Regla 0. Cálculo del parámetro aleatorio.
- Regla 1. Aceleración, si no se encuentra dentro del horizonte de interacción del vehículo o si están apagados sus luces de freno, el vehículo debe acelerar.
- Regla 2. Frenado por interacción de los vehículos.
- Regla 3. Frenado aleatorio.
- Regla 4. Movimiento.

2.3. Modelos mesoscópicos

Definen una función que expresa la probabilidad de que un vehículo a una velocidad determinada se encuentre en cierto tiempo en determinada posición. Comúnmente se utilizan métodos de la mecánica estadística.

Es también importante el revisar los métodos que se utilizar para realizar estimaciones de flotas en la minería.

2.4. Modelos mineros determinísticos

2.4.1. Tiempo de ciclo de camión

Para poder estimar la cantidad necesaria de camiones se debe calcular primero el tiempo del ciclo de transporte, esto es realizado para las diferentes palas que se tengan en la mina, ya que debido a su ubicación se tendrán diferentes tiempos. Cabe notar que en ninguna parte es considerada posibles interacciones entre los camiones, tema que se busca modelar en el trabajo².

$$TCT = TPP + TC + TVC + TPV + TV + TVV + R$$

En donde,

TCT, tiempo de ciclo de la unidad de transporte [min].

TPP, tiempo para posicionarse frente a la unidad de carguío [min].

TC, tiempo de carguío [min].

TVC, tiempo de viaje cargado [min].

TPV, tiempo de posicionamiento para descarga [min].

TV, tiempo de vaciado [min].

TVV, tiempo de viaje vacío [min].

R, retrasos [min].

Entonces,

$$TC = \left[\frac{CUT}{CUC} \right]^* \cdot TCC$$

En donde,

CUT, capacidad de unidad de transporte [ton].

CUC, capacidad de unidad de carguío [ton].

TCC, tiempo de ciclo de carguío.

*, Aproximar al entero superior.

Además,

$$TVC = \frac{DV}{V_{Cargado}}$$

$$TVV = \frac{DV}{V_{Vacio}}$$

En donde,

DV , distancia de viaje.

V_i , velocidad en estado i .

2.4.2. Número de camiones por pala

Se desea estimar el número de camiones por pala.

$$N = \left[\frac{TCT}{TTP + TC} \right]^*$$

Donde,

N , número de camiones requeridos.

Para estimar la flota de camiones además se debe ponderar por la disponibilidad.

$$N_{Camiones} = \frac{N}{Disponibilidad}$$

En donde,

$$Disponibilidad = \frac{Horas_{Efectivas} - Horas_{Mantenición}}{Horas_{Efectivas}}$$

2.4. Modelos mineros probabilísticos

En minería el carguío y transporte es un sistema complejo y por lo tanto se usa generalmente simulación ya que existe incerteza en las diversas componentes y como estas interactúan entre sí. Bajo este concepto se puede estimar la probabilidad de que haya exactamente n camiones disponibles en una flota de N camiones.

$$P_n = \binom{N}{n} \cdot P_a^n \cdot P_{na}^{N-n}$$

En donde,

N , flota.

n , camiones disponibles.

P_a , probabilidad de n camiones disponibles.

P_{na} , probabilidad de $N - n$ camiones no disponibles.

Está también la probabilidad de que haya al menos n camiones disponibles de una flota de N camiones.

$$P_{1,n} = \sum_{x=n}^N \binom{N}{x} \cdot p_a^x \cdot p_{na}^{N-x}$$

3. Datos de entrada

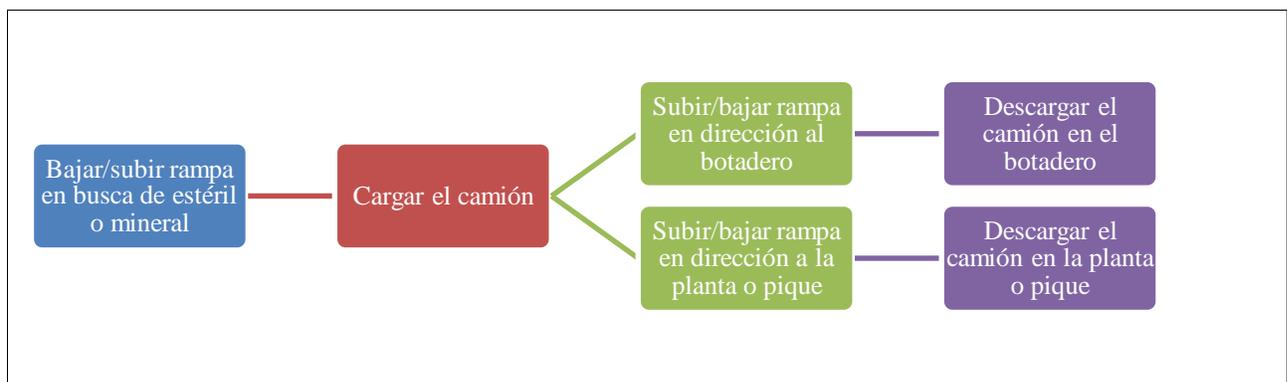
Con el objetivo de realizar la simulación se requieren datos acerca de los tiempos de ciclo de la mina así como también de las características físicas de los camiones utilizados.

3.1. Datos del tiempo de ciclo

Para modelar el ciclo de un camión ha sido necesario identificar los diferentes procesos que este tiene. Es importante también el considerar una desviación estándar en cada uno de los procesos que se listan a continuación.

- Tiempo de carga de un camión.
- Tiempo de viaje del camión.
- Tiempo de descarga de un camión.

Ilustración 1. Diagrama de procesos de estándar de una mina a cielo abierto.



3.2. Características físicas de la mina

Se debe tener conocimiento de las restricciones físicas de la mina a estudiar, las cuales son:

- Número máximo de camiones descargando en un botadero, chancador, stock o pique.
- Cantidad de carriles por ruta.
- Zonas de adelantamiento, si existen.
- Velocidad de los camiones en diferentes sectores de la mina.
- Topografía de la mina.

3.3. Características del camión

Es importante contar con las características de él o los camiones a emplear en la faena, las cuales serían:

- Tamaño del camión.
- Velocidades máximas en subida, bajada y en plano.
- Capacidad de carga del camión.

4. Modelo de calibración

Con el objetivo de validar el software AIMSUN a utilizar se realiza una comparación entre datos reales que entrega el sistema de DISPATCH de la mina Andina, con los valores obtenidos a partir de la simulación.

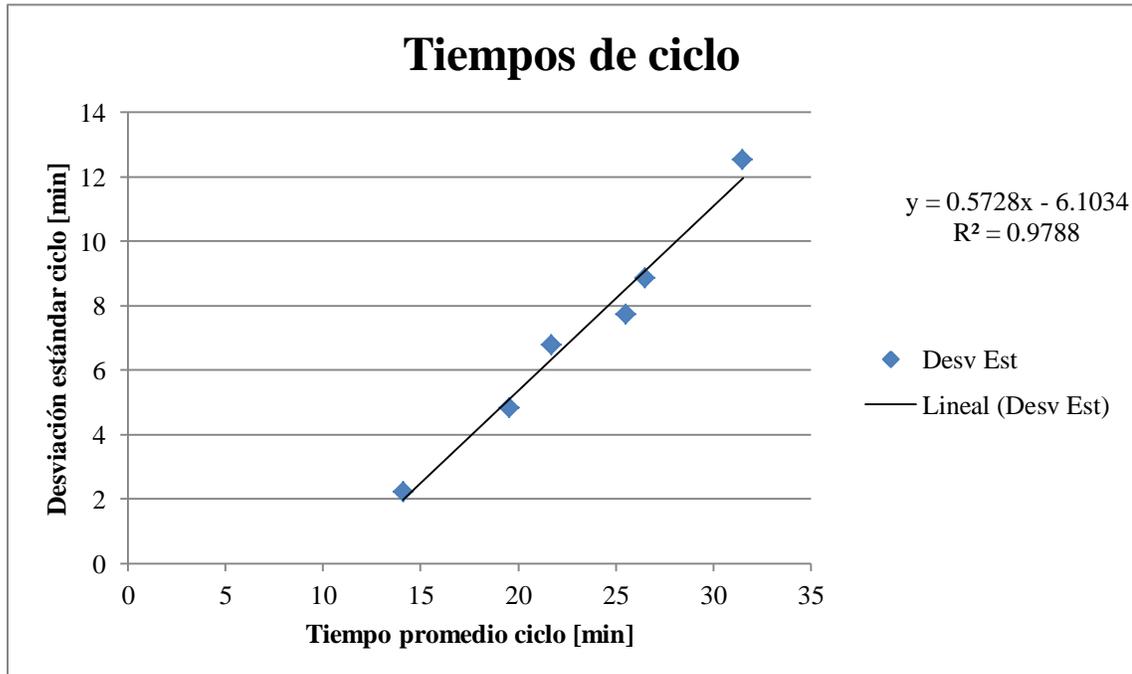
Se cuenta con la información de la mina desde el 1 de Enero de 2010 hasta el 30 de Abril de 2010, un período en el que las condiciones climáticas son similares.

4.1. Tiempos de ciclo

4.1.1. Tiempo de ciclo total

Se cuenta con los datos de un mes de 16 camiones operando, para los cuales se obtuvieron el tiempo de ciclo total y se calculó la desviación estándar presente.

Ilustración 2. Relación entre tiempos promedios y desviación estándar.



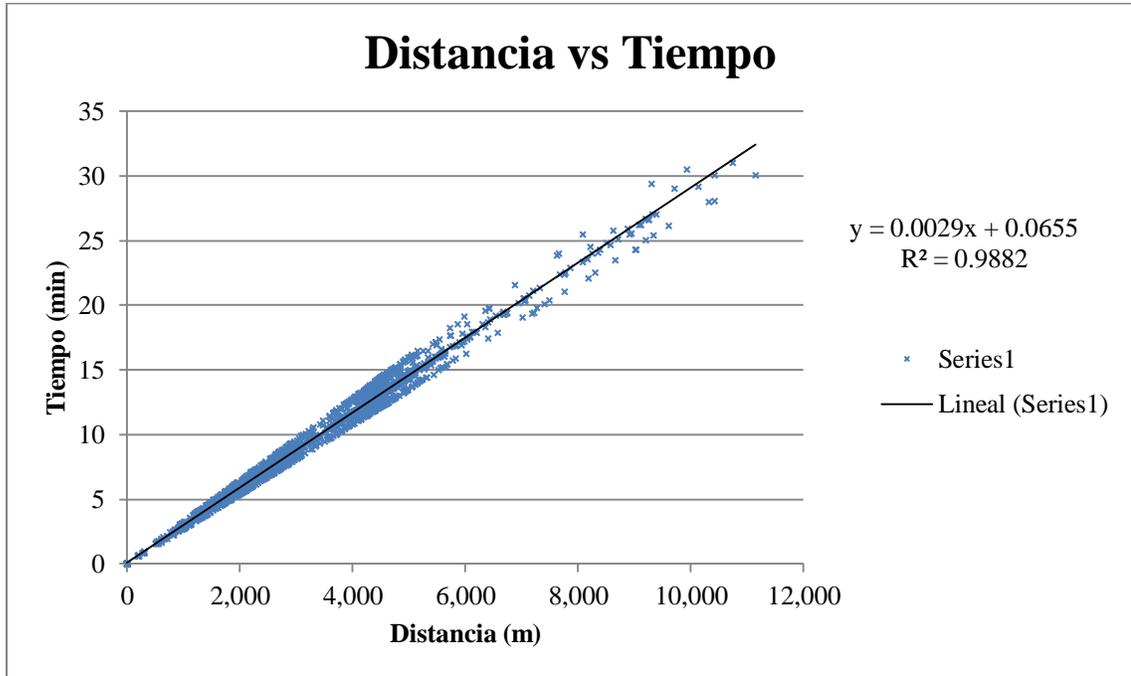
A partir de dicho resultado se puede establecer una dependencia lineal entre la duración de un proceso y la desviación estándar.

4.1.2. Tiempos de viaje

Se cuenta además con datos acerca de la velocidad individual de los camiones así como también de las distancias recorridas en viaje durante 240 turnos, desde el 1 de Enero del 2010 al 30 de Abril del 2010.

Se obtiene el siguiente gráfico que relaciona el tiempo que requiere un camión para recorrer una distancia dada.

Ilustración 3. Tiempos de viaje estimados a partir de las velocidades y distancias medias.



4.1.3. Desviaciones estándar de los procesos

Para el caso de la simulación vial se asume una desviación estándar en los procesos de un $\pm 25\%$.

Tabla 1. Tiempos de ciclo.

Camión	Promedio [s]	Desviación estándar [s]
Tiempo carga para 73 yd ³	108	27
Tiempo carga para 55 yd ³	159	40
Tiempo carga para 31 yd ³	284	71
Tiempo descarga	60	15

4.2. Características físicas de la mina

La mina analizada no cuenta con pistas de adelantamiento. Se tiene además que una pala solo puede cargar un camión a la vez y que solo un camión puede estar descargando en cada pique y botadero.

Se adjunta en los Anexos A un plano detallado con la ubicación de las diferentes entidades involucradas en el proceso.

4.3. Características del camión

Se tiene un camión Komatsu 930E, con las siguientes características:

- Largo: 15,6 (metros).
- Ancho: 8,7 (metros).

Además se cuenta con información acerca de las velocidades que éste tiene en sus diferentes estados dentro de la mina.

Tabla 2. Velocidad de camión Komatsu 930E.

	Vacío [km/h]	Cargado [km/h]
Horizontal	30	30
Subida	25	11
Bajada	25	25

5. Simulación del modelo de calibración

Con los datos previamente descritos se simulan diferentes escenarios, variando las distancias de viaje, luego de esto se compararan dichos tiempos con los que un camión de similares características presenta en la realidad. Esto con el objetivo de asegurar que se está utilizando un programa que simula y modela las condiciones de manera precisa, para poder luego simular casos más extremos.

5.1. Tiempos por ruta

Se simulan tres diferentes rutas, que se pueden identificar más claramente en el plano anexo, las cuales se numeran de la siguiente forma.

Tabla 3. Número de rutas.

Número de ruta	Origen	Destino
1	Pala 2	Pique 1
2	Pala 1	Pique 1
3	Cargador 1	Pique 1

La distancia por ruta se puede observar en la siguiente tabla; esta distancia se mide en el plano adjunto, Anexo A.

Tabla 4. Distancias de viaje.

Número de ruta	Distancia total
1	1,120
2	1,600
3	2,920

Una vez realizadas las simulaciones necesarias para el caso descrito, se obtienen datos acerca de los tiempos de viaje que tiene un camión de ida y de vuelta, a dichos valores se les promedia con lo cual se obtiene la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 5. Tiempos obtenidos a partir de la simulación.

Número de ruta	Tiempo total (min)
1	3.33
2	4.59
3	8.63

5.2. Validación del sistema de modelación

Una vez realizada las simulaciones de los escenarios distintos, se procede a comparar los resultados obtenidos con los datos que se tienen de un escenario real, para así asegurar que el método de simulación es el correcto.

A partir de la simulación se obtiene un tiempo promedio que se demoraron los camiones en recorrer dicha distancia, ese tiempo se llama “Tiempo total simulado”, a partir de la relación obtenida en el capítulo anterior entre el tiempo y la distancia que se tiene del DISPATCH de

Andina, se calcula el tiempo que se toma un camión en recorrer la distancia que se simula, este tiempo se llama “Tiempo real”.

Tabla 6. Comparación de datos reales con simulados.

Número de ruta	Tiempo total simulado (min)	Tiempo real (min)	Error
1	3.33	3.24	3%
2	4.59	4.64	1%
3	8.63	8.52	1%

A partir de los resultados presentados se observa que el modelo tiene un porcentaje muy bajo de error con los datos obtenidos de la realidad, lo cual permite utilizar el modelo de simulación en diferentes escenarios.

6. Pruebas experimentales en el modelo de simulación

Con el objetivo de estudiar los efectos que tiene la congestión en las rutas, se harán diferentes pruebas experimentales en el modelo simulado previamente descrito. Estas serán pruebas de saturación individual y de saturación con interacción entre las rutas, siendo esto último lo de mayor interés que puede entregar la simulación.

Las rutas a congestionar de manera individual serán las siguientes.

Tabla 7. Rutas a congestionar.

Número de ruta	Origen	Destino
1	Sector 8 (Pala 2)	Sector 10 (Pique 1)
2	Sector 7 (Pala 1)	Sector 10 (Pique 1)
3	Sector 13 (Cargador 1)	Sector 10 (Pique 1)

Las pruebas realizadas para ver la congestión por cada ruta separadamente serán las que se muestran a continuación.

Tabla 8. Número de camiones por pruebas individuales.

Número de camiones	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Prueba 1	1	0	0
Prueba 2	3	0	0
Prueba 3	7	0	0
Prueba 4	0	1	0
Prueba 5	0	4	0
Prueba 6	0	7	0
Prueba 7	0	0	1
Prueba 8	0	0	4
Prueba 9	0	0	7

Luego de congestionar las rutas de manera separada se procederá a realizar la simulación de la interacción que se podría tener entre ellas. Para modelar dicho fenómeno se harán las siguientes pruebas.

Tabla 9. Número de camiones por prueba con interacción.

Número de camiones	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
Prueba 10	3	1	0
Prueba 11	3	4	0
Prueba 12	3	4	1
Prueba 13	3	4	4

6.1. Pruebas de rutas congestionadas individualmente

Se congestionan las rutas individualmente y se presentan las ocupaciones que presenten los puntos de carga y descarga, así como también el tiempo de espera que se tenga en cada uno de dichas locaciones.

Se consideran las ocupaciones y tiempos que el programa entregue cuando éste ya se encuentre en un estado estacionario, esto es después de una hora de simulación, que es el tiempo que se le dio para el ingreso de los camiones a cada una de las entidades.

6.1.1. Prueba de congestión de la Ruta 1

Se obtiene los siguientes datos a partir de las simulaciones realizadas para la Ruta 1.

Ilustración 4. Datos de la Pala 2 en la Ruta 1.

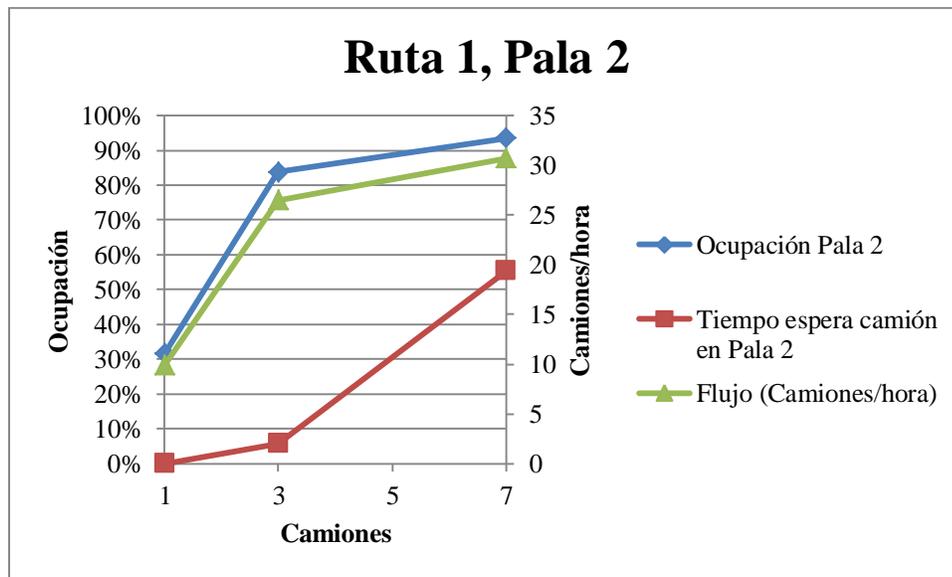
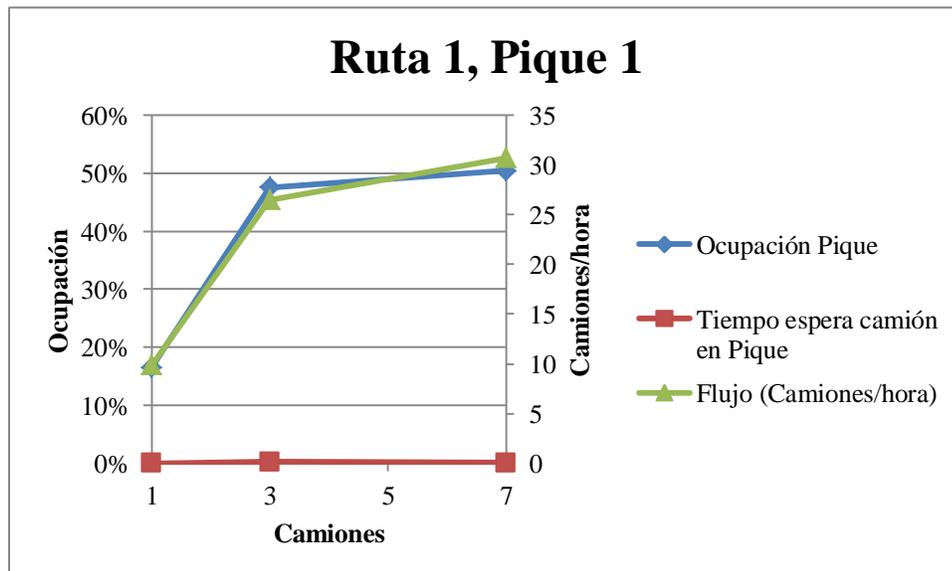


Ilustración 5. Datos del Pique 1 en la Ruta 1.



6.1.2. Prueba de congestión de la Ruta 2

Se obtiene los siguientes datos a partir de las simulaciones realizadas para la Ruta 2.

Ilustración 6. Datos de la Pala 1 en la Ruta 2.

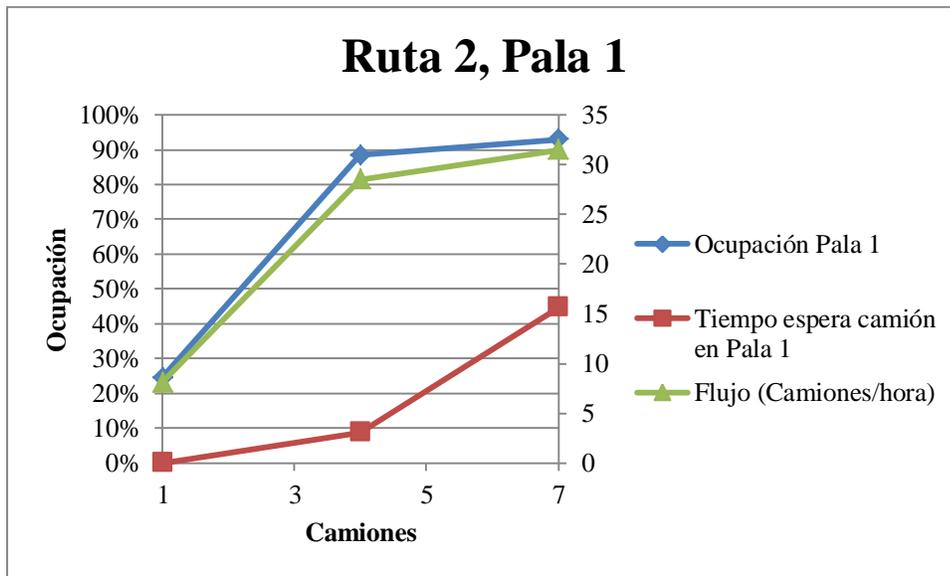
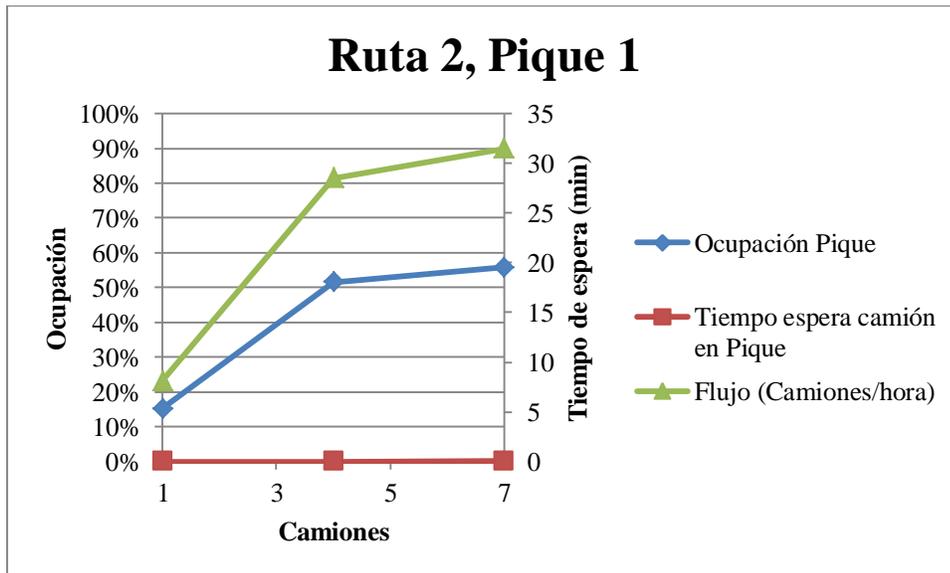


Ilustración 7. Datos del Pique 1 en la Ruta 2.



6.1.3. Prueba de congestión de la Ruta 3

Se obtiene los siguientes datos a partir de las simulaciones realizadas para la Ruta 3.

Ilustración 8. Datos del Cargador 1 en la Ruta 3.

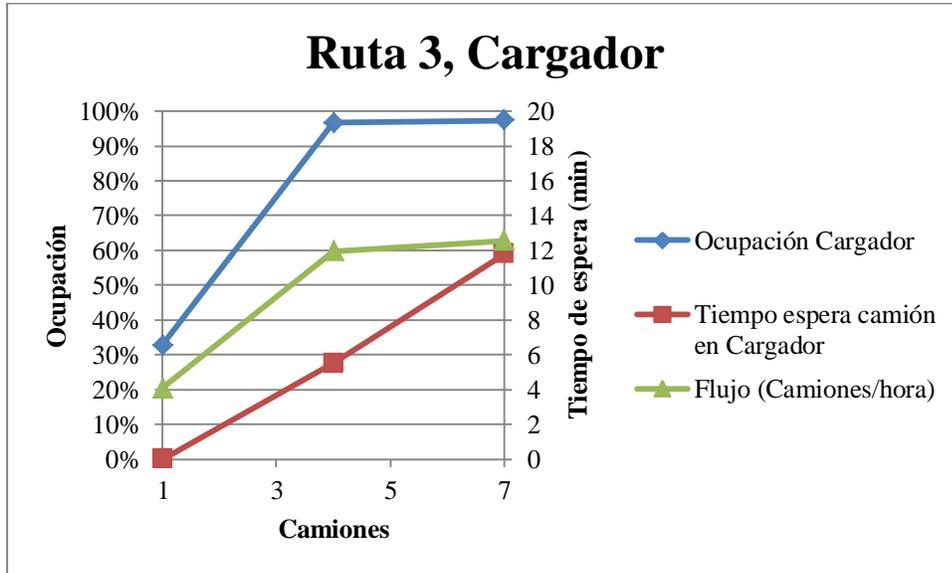
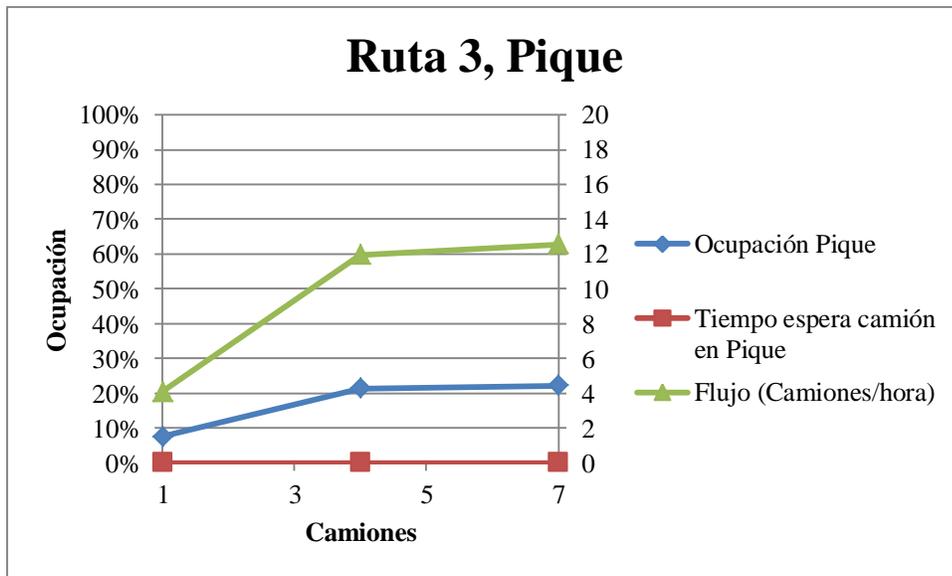


Ilustración 9. Datos del Pique 1 en la Ruta 3.



6.2. Pruebas de rutas congestionadas interactuando

Se realizan diferentes pruebas con una ruta ya congestionada, en este caso se toma la Ruta 1 trabajando a un alto nivel de ocupación (3 camiones), dicho número se selecciona porque es el que el modelo minero entrega como la capacidad de saturación de la Pala 2. Ya con la Ruta 1 congestionada, se realizan pruebas asignándole diferente número de camiones a otra ruta, primero a la Ruta 2, y luego a la Ruta 3.

Se utiliza la siguiente denominación para la combinación de las rutas que están interactuando.

Tabla 10. Denominación de rutas interactuando.

Número de ruta	Significado
Ruta 4	Ruta 1 + Ruta 2
Ruta 5	Ruta 4 + Ruta 3

6.2.1. Prueba de congestión de la Ruta 4

Los tres primeros camiones se encuentran operando en la Ruta 1, luego el cuarto camión se le agrega a la Ruta 2, y posteriormente a la Ruta 2 se le agregan 3 camiones más para dar un total de 7 camiones operando simultáneamente.

Ilustración 10. Datos de la Pala 2 en la Ruta 4.

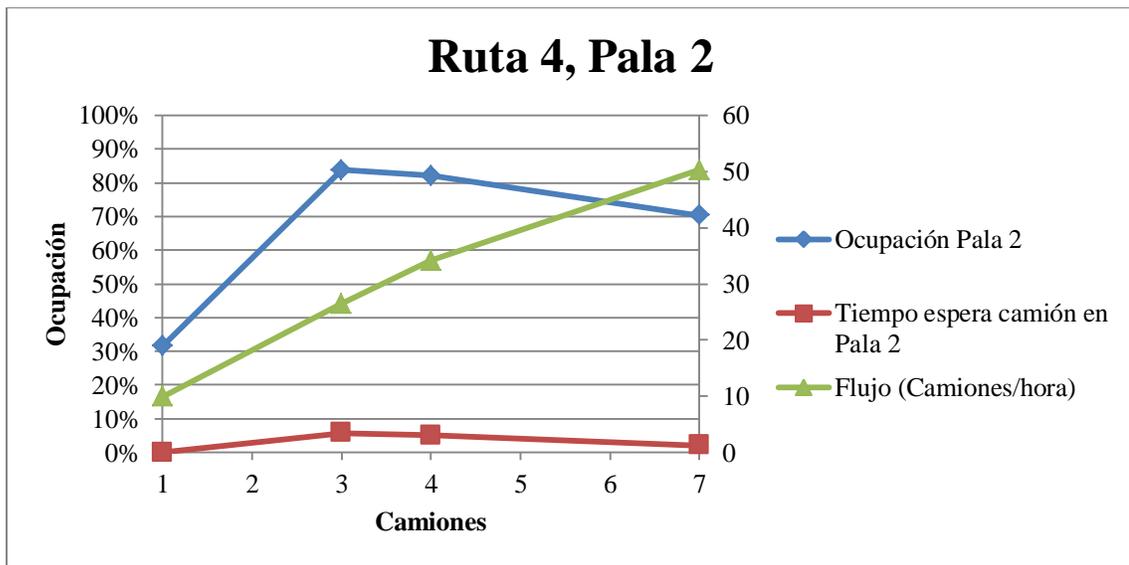


Ilustración 11. Datos de la Pala 1 en la Ruta 4.

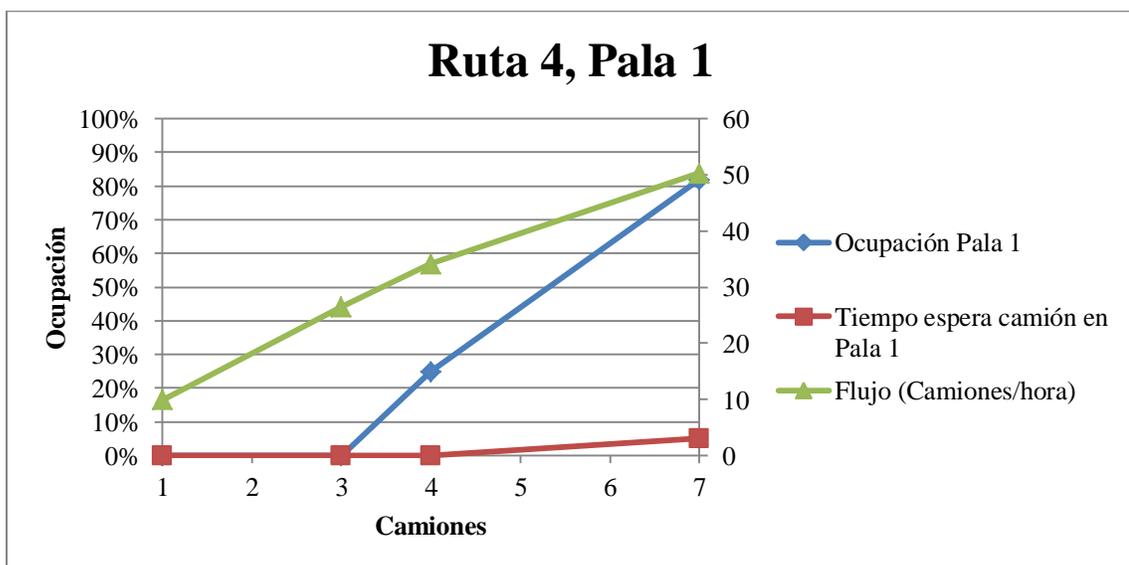


Ilustración 12. Datos del Pique 1 en la Ruta 4 para camiones venidos de la Pala 2.

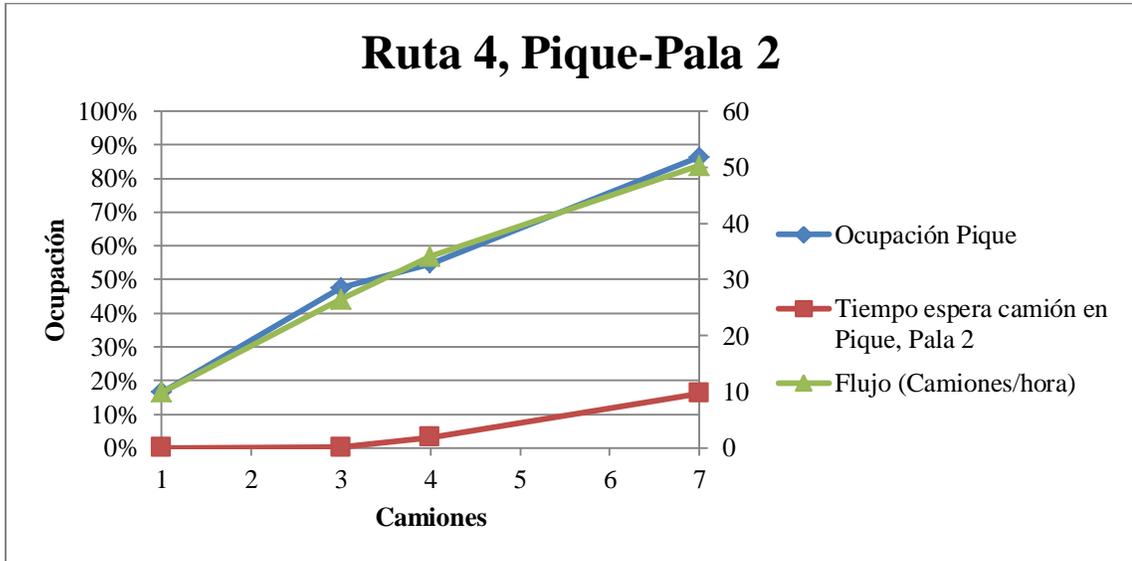
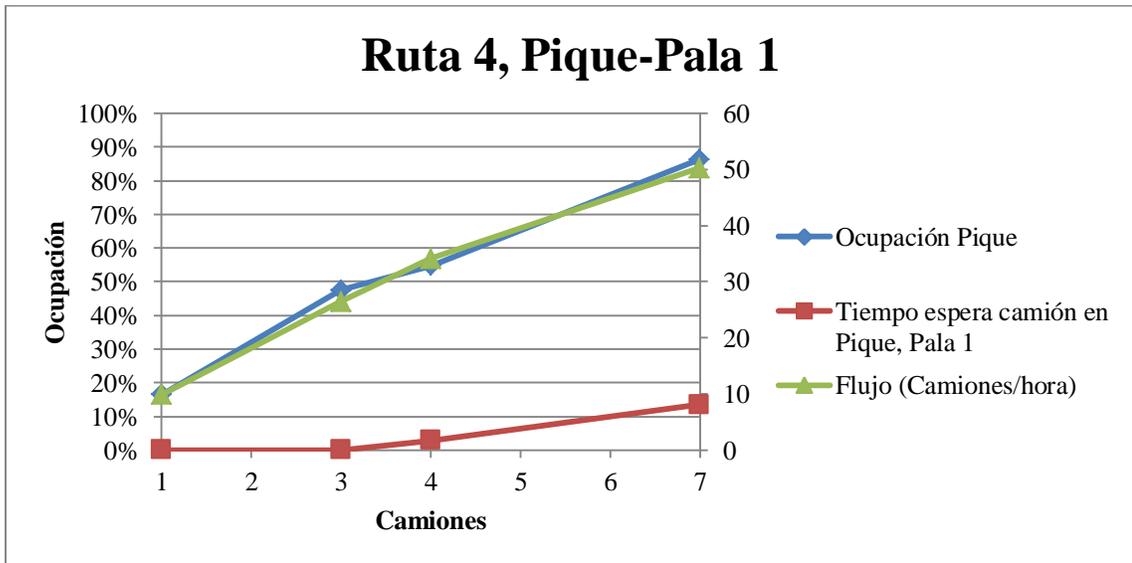


Ilustración 13. Datos del Pique 1 en la Ruta 4 para camiones venidos de la Pala 1.



6.2.2. Prueba de congestión de la Ruta 5

Se busca que al tener ya la Ruta 4 congestionada, agregarle nuevos camiones desde la Ruta 3, primero un camión y luego 3 más para ver como esto afecta las ocupaciones y tiempos de espera, así como también medir el flujo que se tiene en la ruta.

Ilustración 14. Datos de la Pala 2 en la Ruta 5.

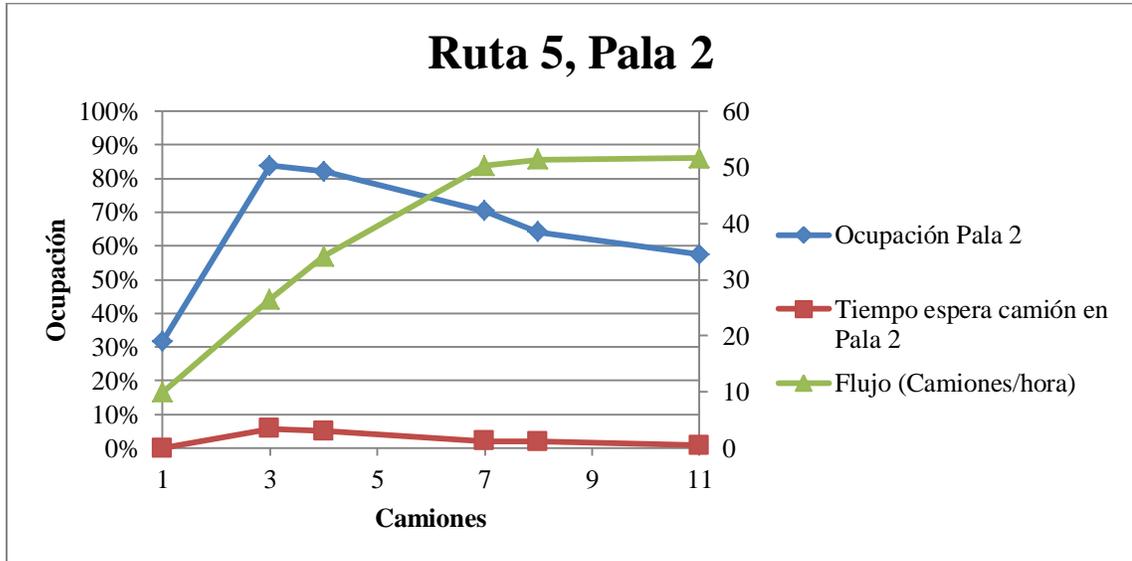


Ilustración 15. Datos de la Pala 1 en la Ruta 5.

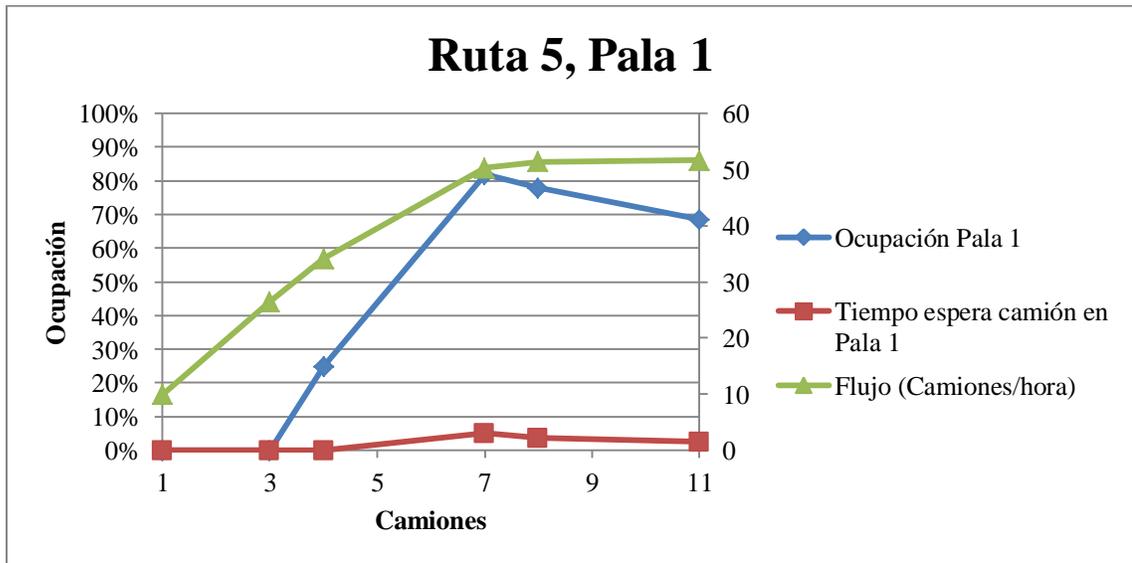


Ilustración 16. Datos del Cargador en la Ruta 5.

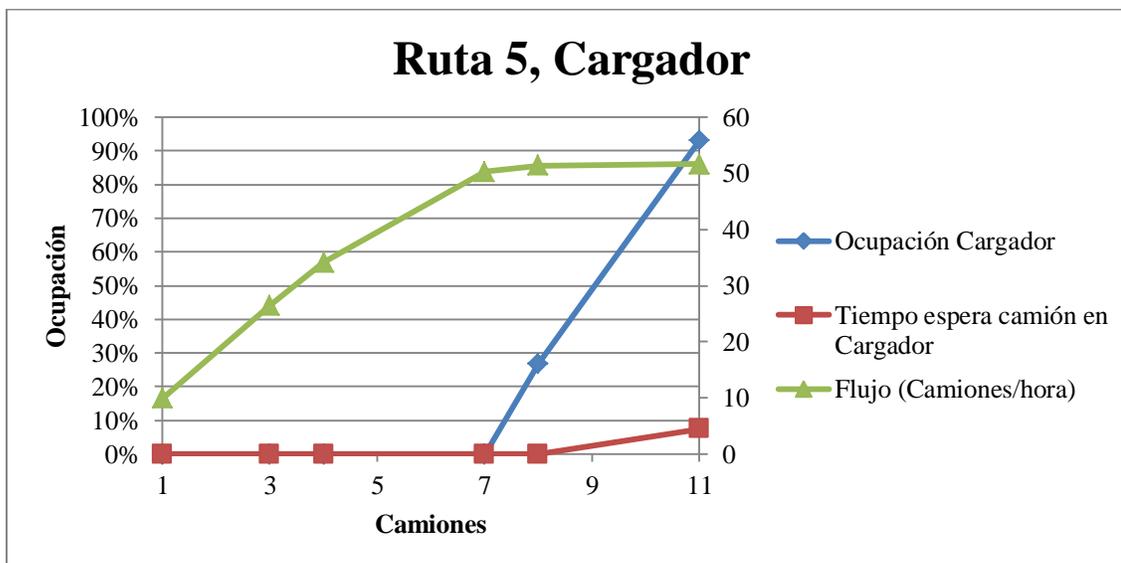


Ilustración 17. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos de la Pala 2.

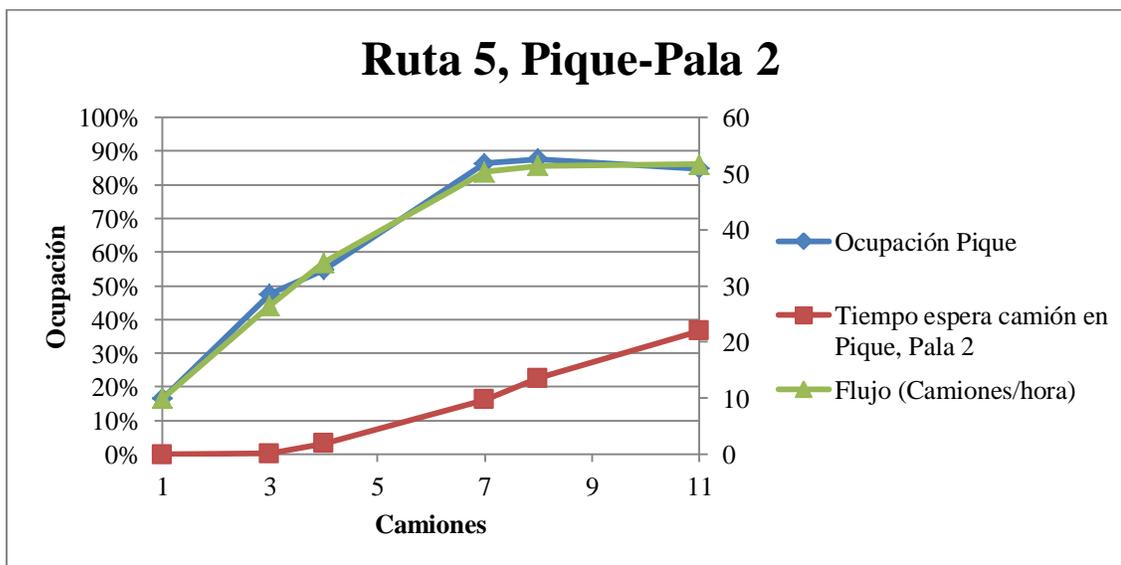


Ilustración 18. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos de la Pala 1.

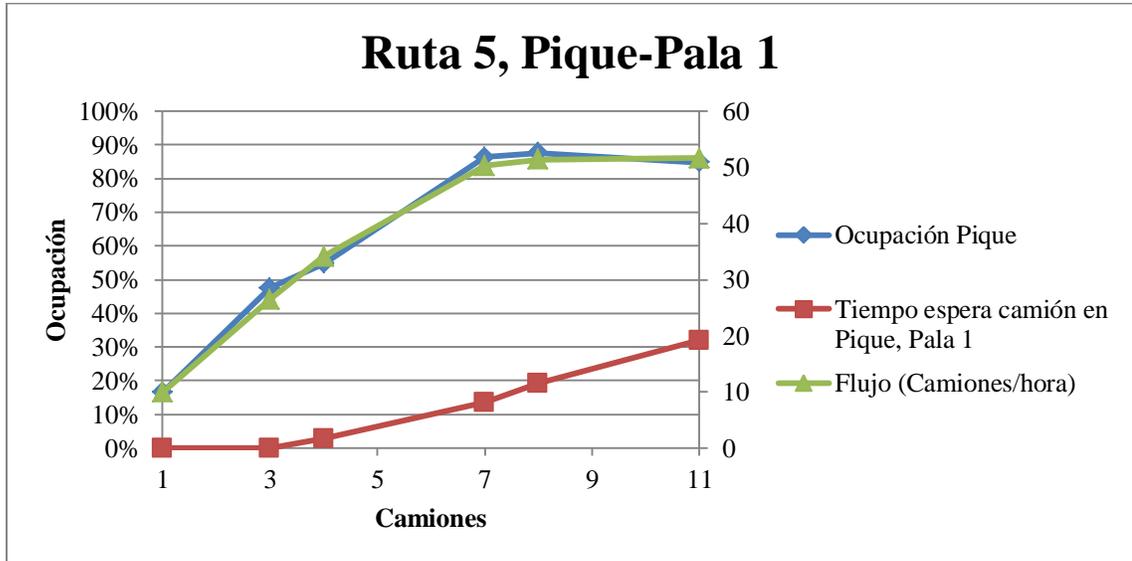
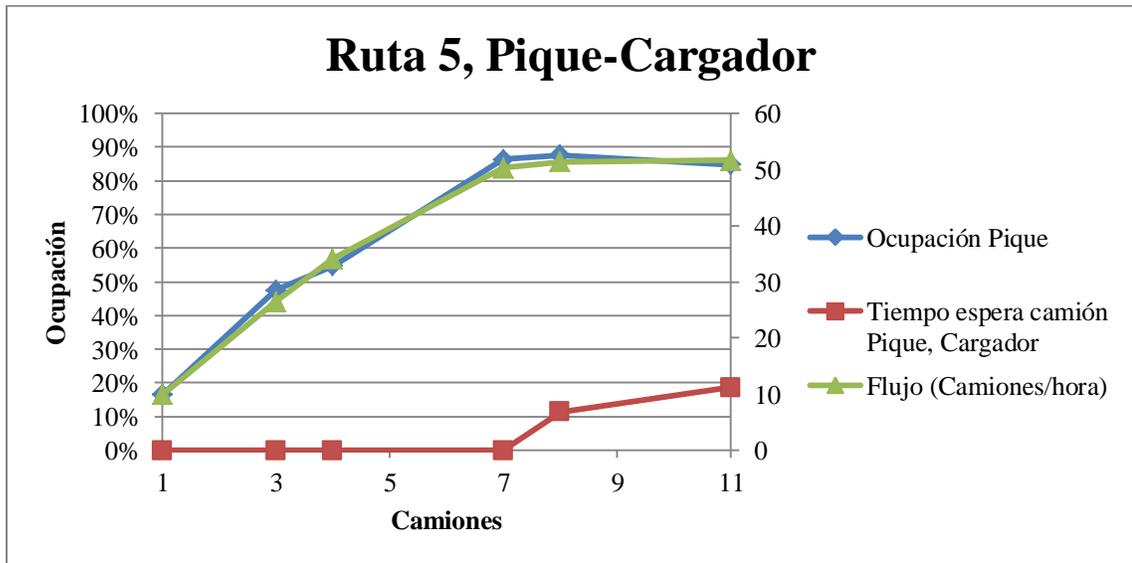


Ilustración 19. Datos del Pique 1 en la Ruta 5 para camiones venidos del Cargador.



7. Caso Antamina

7.1. Descripción de la faena

La mina está ubicada en la quebrada Antamina, en el distrito de San Marcos, Perú, a una latitud de 9°32'S y a una longitud de 77°03'W, y tiene una vida útil estimada hasta el año 2029. Se trata de una operación a tajo abierto que explota un depósito tipo “skarn”.

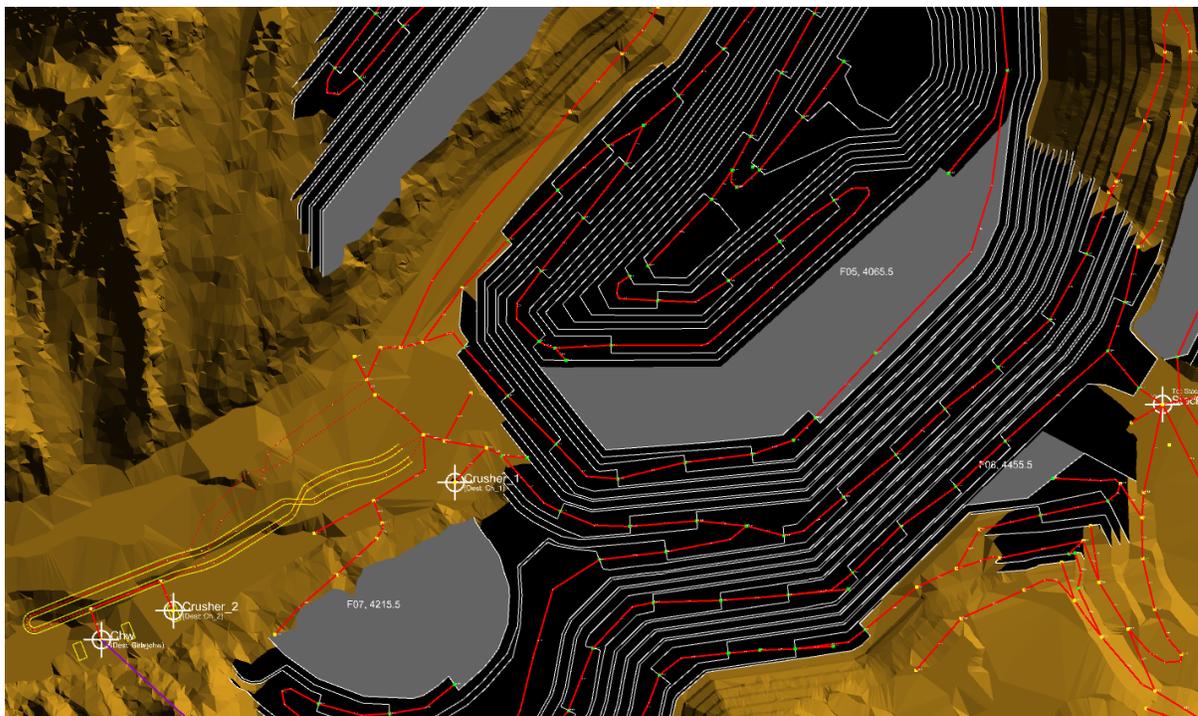
7.2. Problemática de la congestión en Antamina

A partir del año 2014, se pretende comenzar a operar un chancador de estéril en el valle Antamina, que se identifica posteriormente en imágenes. La ubicación de este chancador aumentará el tráfico de vehículos por la zona, razón por la cual se estudia el impacto que tiene el operar con rutas congestionadas, principalmente referido al número de camiones.

7.3. Identificación de la zona

La zona a analizar y aplicar el factor de congestión es la siguiente.

Ilustración 20. Rutas de salida hacia el valle Antamina a partir del año 2014.



7.4. Identificación de los puntos de entrada, descarga y rutas.

Para la correcta microsimulación del sistema se deben identificar los puntos de ingreso de flujo, así como también los puntos de descarga de los camiones que están entrando al sistema.

Para el año 2014 se logra observar que existen 2 salidas principales de la mina y una salida desde el stock, por lo tanto se tienen 3 puntos de ingreso al sistema, existen también 3 zonas en donde

se puede descargar en el sistema, ya sea en la zona del chancado de estéril, chancado de mineral o para dejar en stock el mineral.

Se identifican las rutas que interactúan en un año específico (2014), y el tonelaje que estará involucrada en cada uno de ellas, para así estimar el número de camiones por hora promedio que pasará por ellas. En total se logran identificar 7 rutas activas; las rutas 4, 5 y 6 existen pero no se encuentran activas en este período.

Tabla 11. Origen y destino de las rutas.

Ruta	Origen	Destino
1	MINA_1	STOCK
2	MINA_1	CHW
3	MINA_1	CHM
7	MINA_3	STOCK
8	MINA_3	CHW
9	MINA_3	CHM
10	STOCK_1	CHM

Ilustración 21. Ruta 1, Valle Antamina.

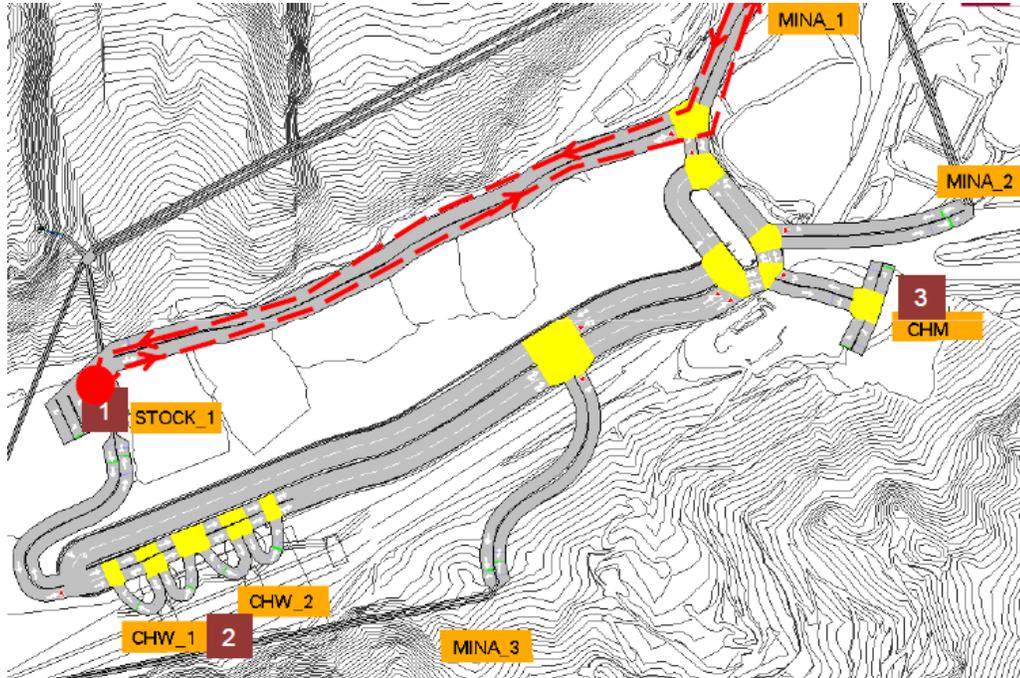


Ilustración 22. Ruta 2, Valle Antamina.

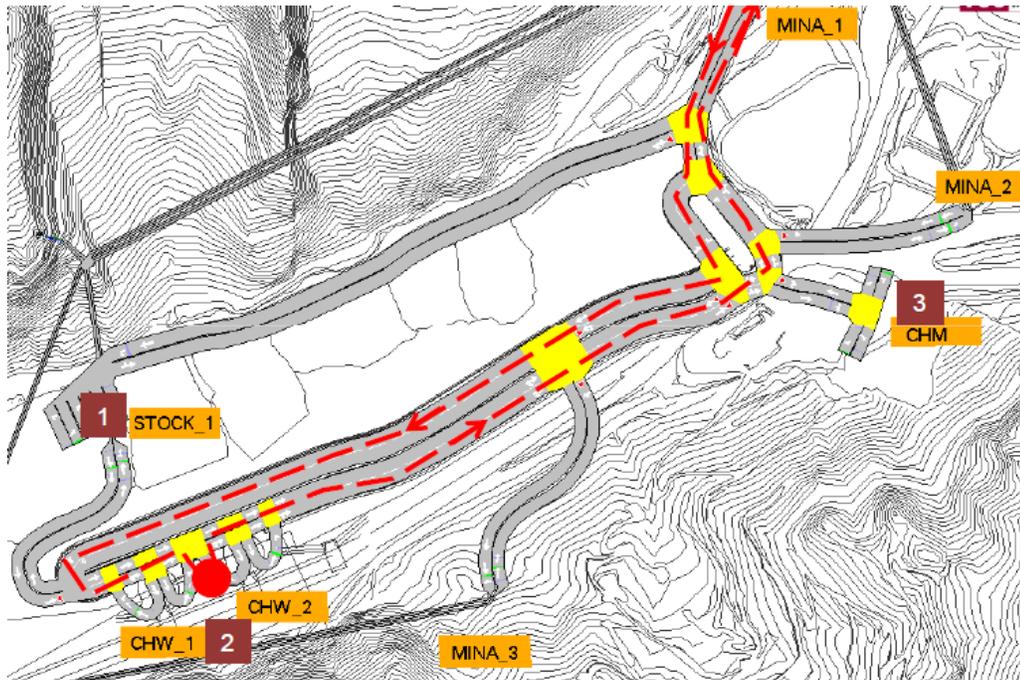


Ilustración 23. Ruta 3, Valle Antamina.

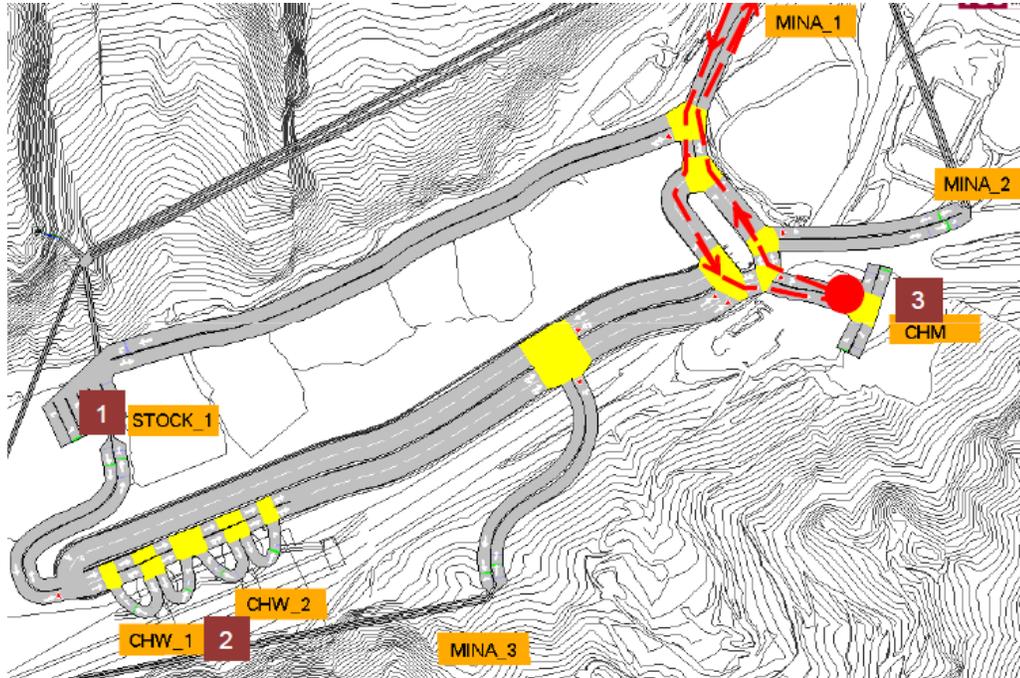


Ilustración 24. Ruta 7, Valle Antamina.

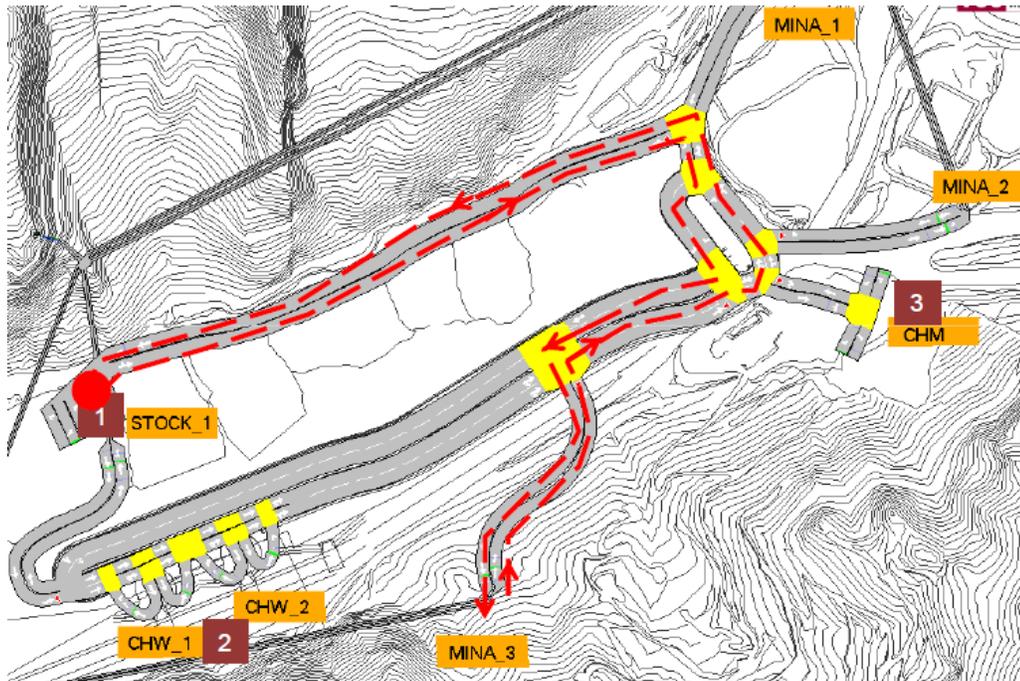


Ilustración 25. Ruta 8, Valle Antamina.

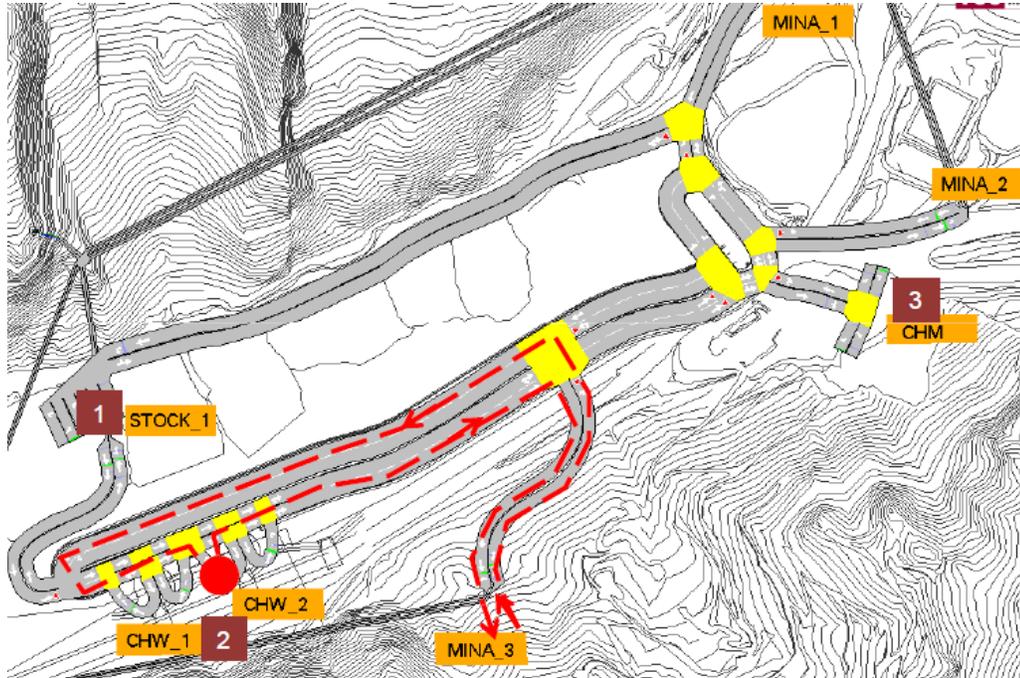


Ilustración 26. Ruta 9, Valle Antamina.

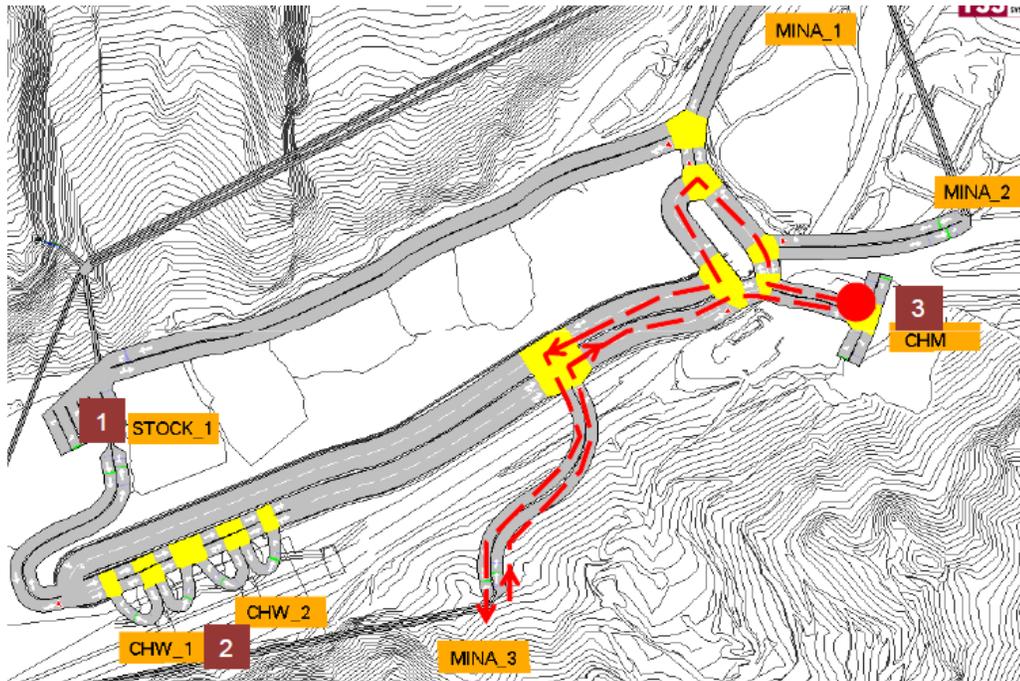
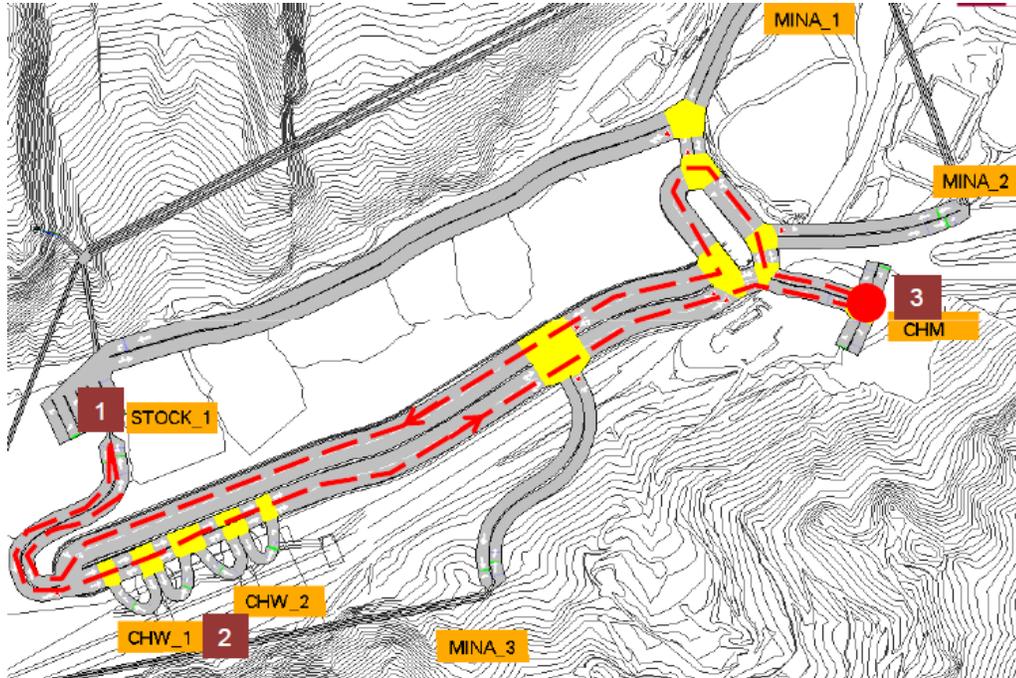


Ilustración 27. Ruta 10, Valle Antamina.



7.6. Casos simulados

Para el caso de Antamina en el año 2014 se estudian 18 diferentes casos, en los cuales se tiene como una constante el tiempo de descarga en los chancadores y stock, 2.38 (min) y 1.78 (min) respectivamente. Se varía el flujo que ingresa a los puntos de chancado de estéril y mineral, para establecer diferentes casos de estudio. La simulación se realiza bajo la base de un ingreso constante de camiones al sistema.

7.6.1. Variando flujo a chancador de estéril

Tabla 12. Flujo de camiones variando el flujo al chancador de estéril.

Flujo (camiones /hora)	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 7	Ruta 8	Ruta 9	Ruta 10	Tota l
CB	12	48	11	3	6	6	15	101
CB -50%	12	24	11	3	3	6	15	74
CB -30%	12	34	11	3	4	6	15	85
CB -20%	12	38	11	3	5	6	15	90
CB -10%	12	43	11	3	5	6	15	95
CB +10%	12	53	11	3	7	6	15	107
CB +20%	12	58	11	3	7	6	15	112
CB +30%	12	62	11	3	8	6	15	117
CB +50%	12	72	11	3	9	6	15	128
CB +70%	12	82	11	3	10	6	15	139
CB +100%	12	96	11	3	12	6	15	155

7.6.2. Variando flujo a chancador de mineral

Tabla 13. Flujo de camiones variando el flujo al chancador de mineral.

Flujo (camiones/hora)	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 7	Ruta 8	Ruta 9	Ruta 10	Tota l
CB	12	48	11	3	6	6	15	101
CB -50%	12	48	6	3	6	3	8	86
CB -30%	12	48	8	3	6	4	11	92
CB -20%	12	48	9	3	6	5	12	95
CB -10%	12	48	10	3	6	5	14	98
CB +10%	12	48	12	3	6	7	17	105
CB +20%	12	48	13	3	6	7	18	107
CB +30%	12	48	14	3	6	8	20	111
CB +50%	12	48	17	3	6	9	23	118

7.7. Características de los camiones utilizados en la simulación

Los camiones utilizados son los Caterpillar 793F, de los cuales se identifican las principales características para ser utilizados en la simulación.

- Ancho 8 (metros).
- Largo 14 (metros).

Tabla 14. Velocidad de camión Caterpillar 793F.

	Vacio (km/h)	Cargado (km/h)
Horizontal	43	31
Subida	25	10
Bajada	28	15

8. Resultados de la simulación en el Valle Antamina

Se presentan a continuación los gráficos de los tiempos y el número de descargas involucradas en las diferentes rutas.

8.1. Resultados de variar el flujo al chancador de estéril

8.1.1. Datos recopilados de las simulaciones

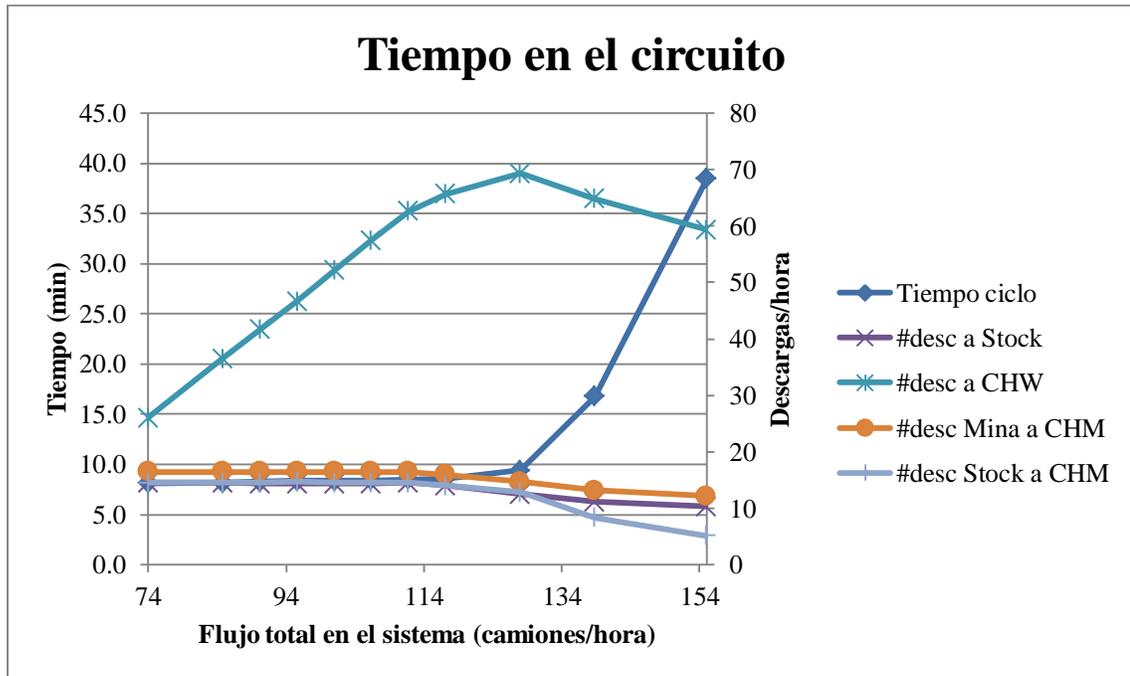
Tabla 15. Tabla resumen de resultados de las simulaciones.

Nombre	Flujo (camiones/h)	Número de descargas (descargas/h)				Tiempo (min)
	Flujo total	a Stock	a CHW	Mina a CHM	Stock a CHM	Tiempo ciclo
CB -50%	74	14.5	26.0	16.5	14.5	8.1
CB -30%	85	14.5	36.5	16.5	14.5	8.2
CB -20%	90	14.3	41.7	16.5	14.5	8.2
CB -10%	95	14.3	46.7	16.5	14.7	8.3
CB	101	14.3	52.2	16.5	14.5	8.4
CB +10%	107	14.3	57.5	16.5	14.5	8.4
CB +20%	112	14.5	62.7	16.5	14.5	8.4
CB +30%	117	14.0	65.7	16.0	14.0	8.6
CB +50%	128	12.5	69.3	14.7	12.8	9.4
CB +70%	139	11.2	64.8	13.2	8.3	16.8
CB +100%	155	10.3	59.3	12.2	5.2	38.5

Para más detalles por ruta ver Anexo B.

8.1.2. Gráficos obtenidos de los datos

Ilustración 28. Variación del flujo a los chancadores de estéril.



Para gráficos más detallados ver Anexo C.

8.2. Resultados de variar el flujo al chancador de mineral

8.2.1. Datos recopilados de las simulaciones

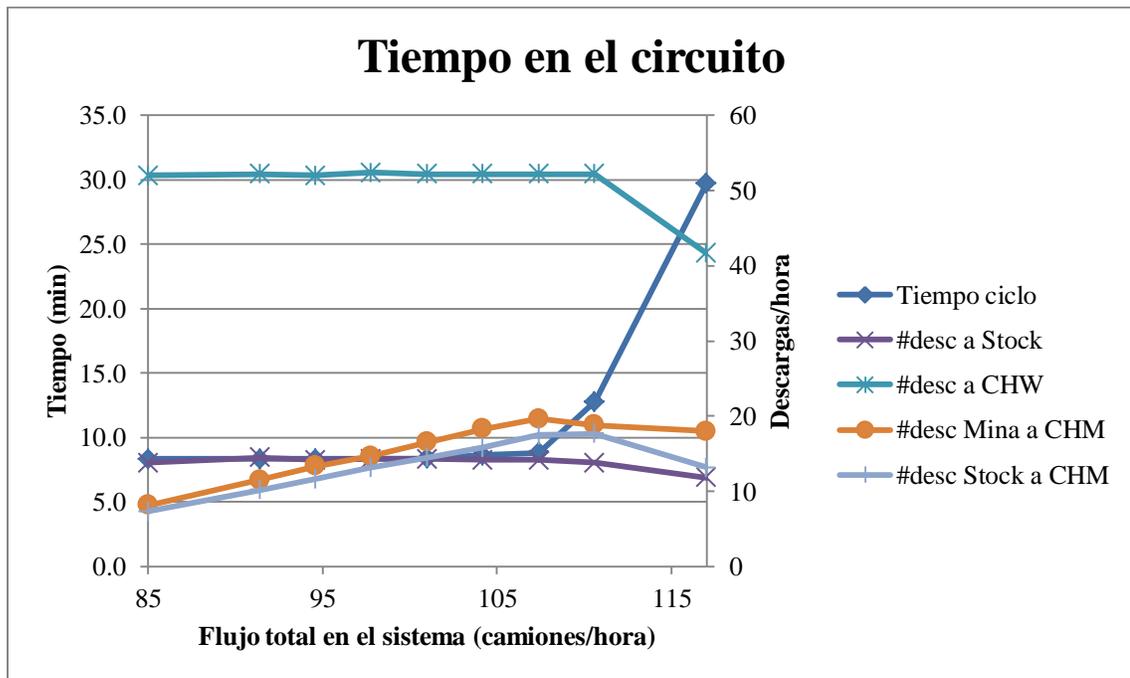
Tabla 16. Tabla resumen de resultados de las simulaciones.

Nombre	Flujo	Número de descargas (descargas/h)				Tiempo (min)
	(camiones/h)	a Stock	a CHW	Mina a CHM	Stock a CHM	Tiempo ciclo
CB -50%	85	13.8	52.0	8.2	7.3	8.3
CB -30%	91	14.5	52.2	11.5	10.2	8.3
CB -20%	95	14.3	52.3	14.7	13.2	8.3
CB -10%	98	14.3	52.3	14.7	13.2	8.3
CB	101	14.3	52.2	16.5	14.5	8.4
CB +10%	104	14.2	52.2	18.3	15.8	8.6
CB +20%	107	14.2	52.2	19.7	17.5	8.8
CB +30%	111	13.8	52.2	18.8	17.7	12.8
CB +50%	117	11.8	41.7	18.0	13.2	29.7

Para más detalles por ruta ver Anexo D.

8.2.2. Gráficos obtenidos de los datos

Ilustración 29. Variación del flujo al chancador de mineral.



Ver gráficos más detallados ver Anexo E.

9. Análisis de resultados del caso Valle Antamina

Con el objetivo de tener un estimado de las toneladas por año que puede soportar cada sistema, se realiza el cálculo a partir de la siguiente fórmula.

$$Ton (Mtpa) = \frac{\frac{días}{año} \cdot \frac{horas}{días} \cdot capacidad\ camion(t) \cdot Ut(\%) \cdot Disp(\%) \cdot Desc\left(\frac{descargas}{hora}\right)}{1,000,000}$$

En donde,

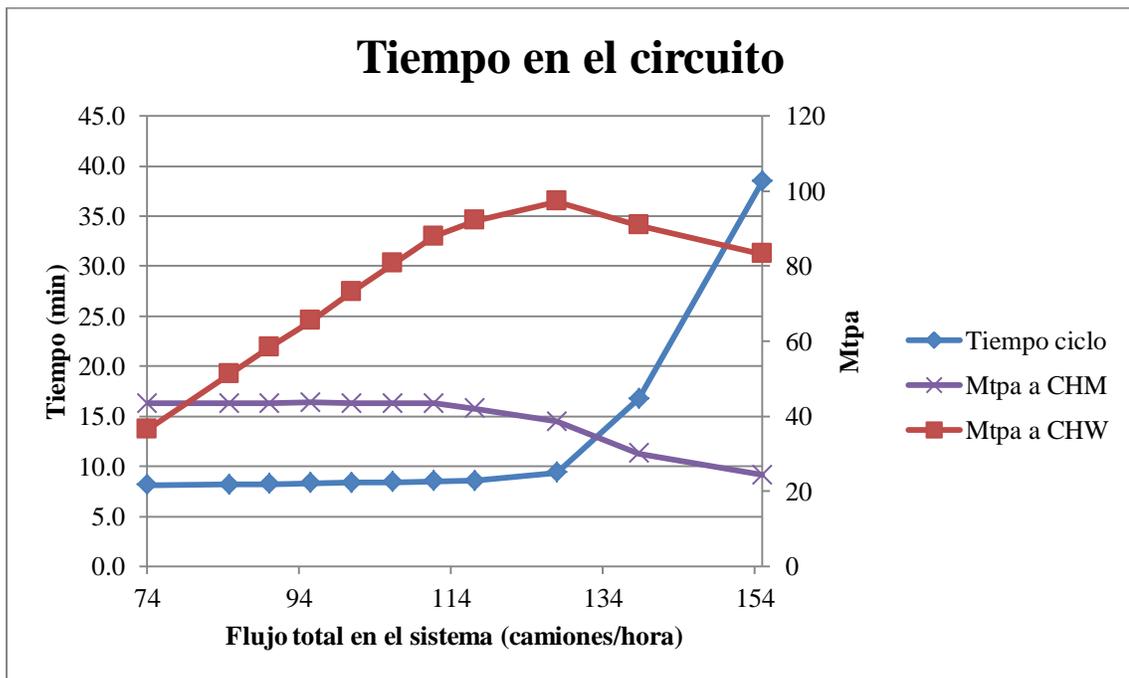
$$Capacidad\ camion = 231 (t)$$

$$Ut = 82\%$$

$$Disp = 84.5\%$$

9.1. Análisis de variar el flujo al chancador de estéril

Tabla 17. Análisis de tpa para diferentes flujos.

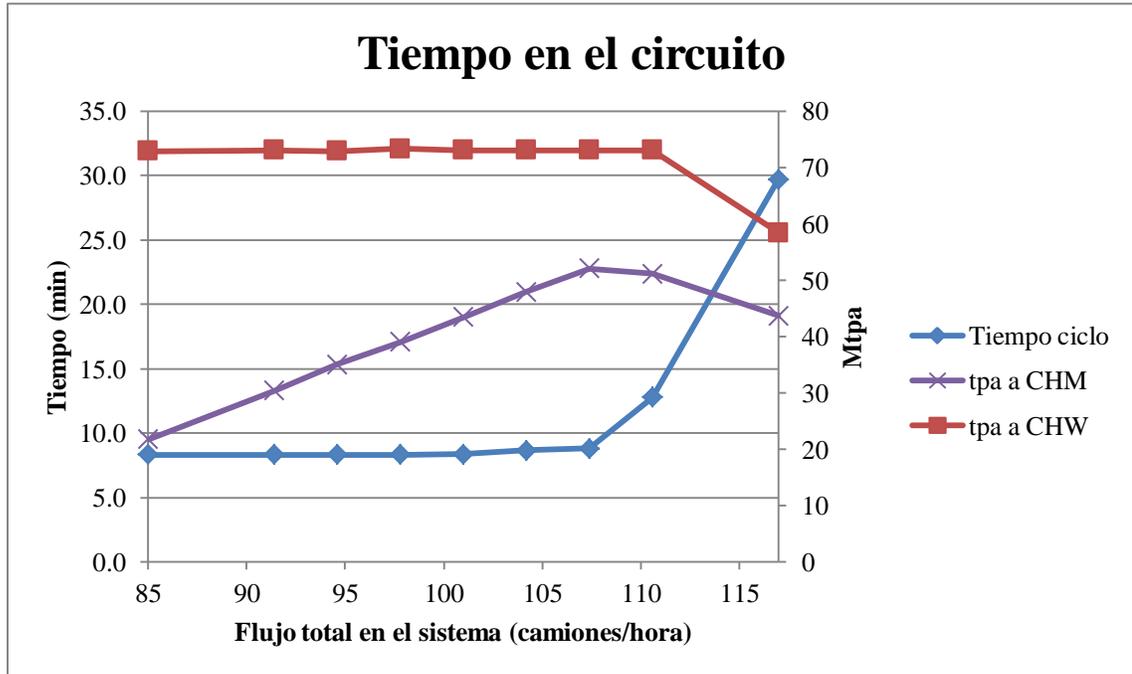


Se puede observar que para el chancado de estéril hasta aumentar un 30% el envío de camiones a los chancadores de estéril no presenta grandes problemas de congestión, pudiendo procesar hasta 92 [Mtpa].

A partir de aumentar en un 50% el flujo de camiones hacia los chancadores de estéril se presentan problemas de pérdidas de tiempos por la interacción entre los camiones así como también por las colas encontradas en los puntos de descarga. Con un 70% de aumento del flujo de estéril al sistema de chancado, el sistema colapsa por completo, ya que el tiempo en que el camión se encuentra en la zona de chancado aumenta de manera exponencial.

9.2. Análisis de variar el flujo al chancador de mineral

Tabla 18. Análisis de tpa para diferentes flujos.



Se tiene que al aumentar en un 20% el flujo hacía el chancado de mineral no existen pérdidas de tiempos por congestión, pero a partir de aumentar un 30% los camiones que se envían se presenta un aumento en el tiempo de ciclo del camión que para este caso es de 5 minutos. En el caso de aumentar en un 50% el flujo el aumento de tiempo es de aproximadamente 35 minutos.

Cabe notar también que el número de descargas que se tienen en cada punto también disminuye lo que hace referencia a un colapso en el sistema al operar a altos flujos de camiones.

10. Conclusiones

10.1. Conclusiones generales

- Es posible el aplicar un software de simulación vial para modelar el tránsito de una operación minera a cielo abierto.
- Los valores encontrados a partir del programa de simulación vial arrojan menos de un 5% de error con respecto a los que se pueden encontrar en la realidad, esto comparándolos con datos obtenidos a través del sistema de DISPATCH de la mina.
- Es necesario calibrar el modelo para cada caso específico, ya que cada faena tiene desempeños diferentes que hacen necesariamente que cada escenario deba ser estudiado de manera particular para analizar su comportamiento.
- El principal parámetro que incide en la congestión es el tiempo que el camión está en los puntos de carga y descarga, otros parámetros que tienen importancia en la congestión son la morfología de la red de caminos que se tenga y las velocidades de los camiones.

10.2. Conclusiones específicas

- Al modelar el caso del Valle Antamina se encontró que la red de caminos que se tienen estipulados para el año 2014. Para dicho año el sistema es más sensible a presentar problemas de congestión cuando varíe el flujo de camiones al chancador de mineral.
- El límite del chancador de mineral es de 52 [Mtpa] que se puede obtener al aumentar un 20% el flujo de mineral.
- El límite del sistema chancador de estéril es de 92 [Mtpa] que se encuentra al enviar un 30% más de estéril.
- El chancador de mineral presenta pérdidas asociadas a la congestión de camiones a partir de aumentar un 30% el flujo de camiones, al igual que los chancadores de estéril.
- Al aumentar un 50% el flujo hacía el chancado de mineral, este afecta a las descargas producidas en los chancadores de estéril, y viceversa.
- La salida Mina_3 se ve altamente afectada al presentarse congestión en el chancador de mineral, debido a la ubicación que tiene la salida en el circuito formado.
- La salida de Stock es mayormente afectada en el caso que los chancadores de estéril sean los saturados, ya que su salida se ubica muy cerca de éstos.

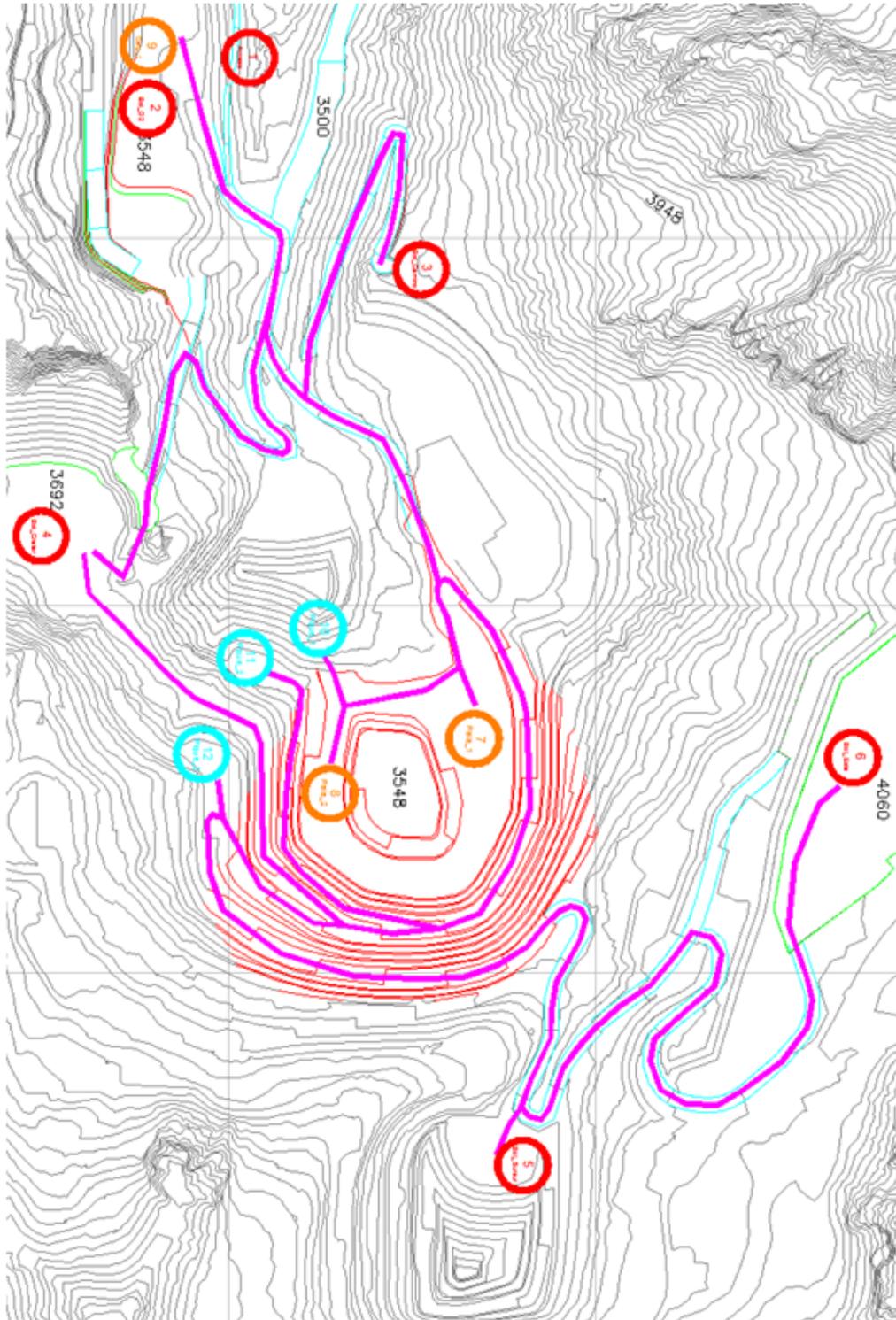
Referencias

- WIKIPEDIA. Tránsito vehicular [en línea]. http://es.wikipedia.org/wiki/Tránsito_vehicular [consulta:06 julio 2010]
- CASTRO, R. 2008. Cátedras MI57G.
- N. CETIN, ICERARSLAN y A. OKUDUCU. 2001. Computer Simulation of Truck/Shovel System at Tuncbilek Coal Mine Using GPSS/H. En: 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET 2001. Kuthaya, Turquía. Dumlupinar University, Department of Mining Engineering. 10p
- JARAMILLO, D. 2005. Simulación y control de tráfico vehicular por semaforización. Memoria de Ingeniero Electrónico. Colombia, Medellín, Pontificia Universidad Bolivariana, Facultad de Ingeniería Electrónica. 139p.
- CHANCA, J.A. y CASTELLANOS, J.A. 2004. Simulación microscópica de tráfico urbano y su aplicación en un área de la ciudad de Zaragoza. En: XXV Jornada de Automática. Ciudad Real, España. 10p.
- WORD, B.D. 2010. "A Traffic Model for Velocity Data Assimilation". Applied Mathematics Research Express. Vol 2010. No. 1. Pp.1-35.

Anexo A

Modelo de calibración

Ilustración 30. Plano de ubicación de las entidades.

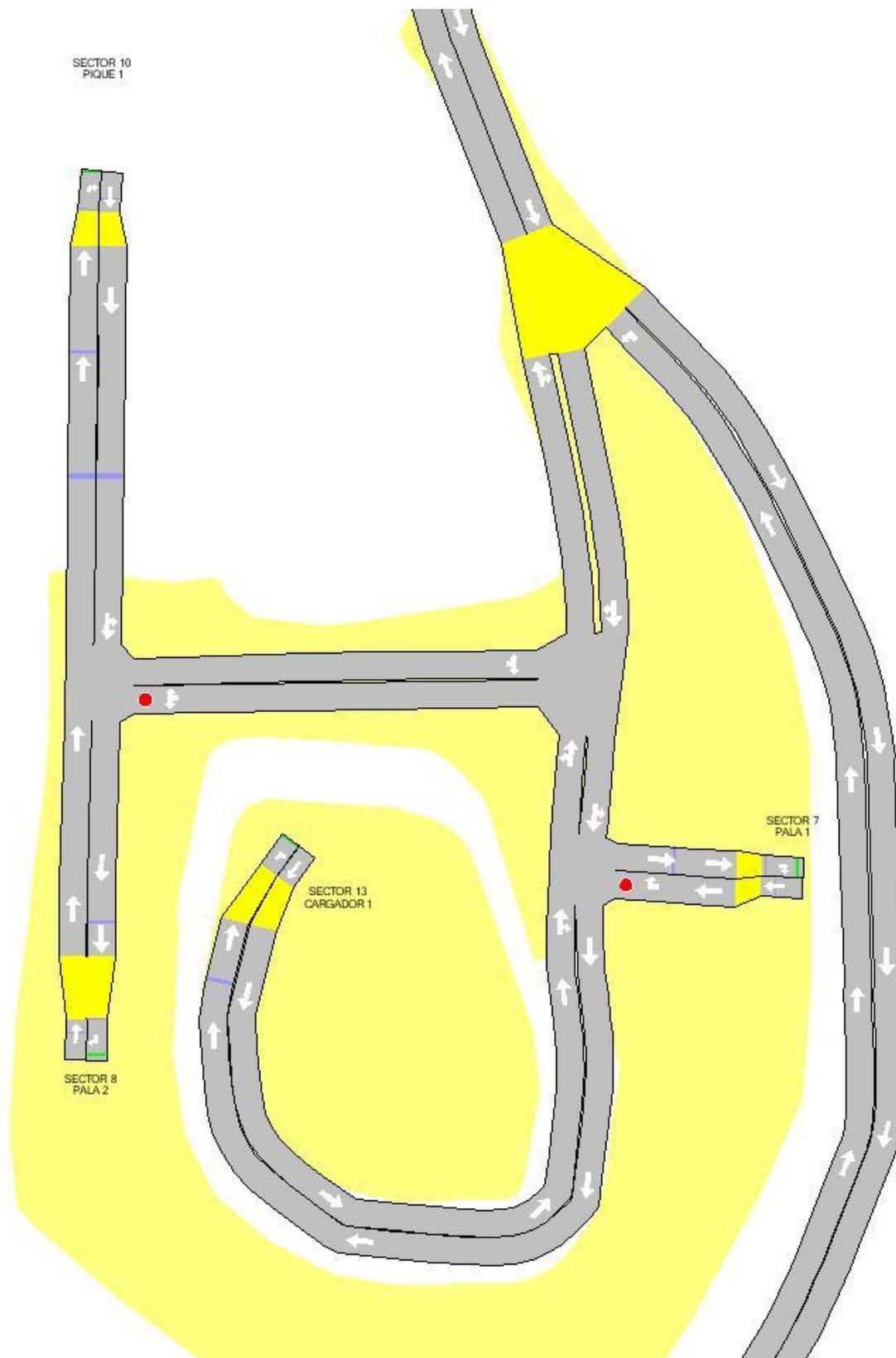


Los puntos involucrados son los siguientes:

Tabla 19. Detalle de los sectores.

Sector N°	Nombre
1	Acceso
2	Bot_D2
3	Bot_Camino
4	Bot_Crater
5	Bot_Sursur
6	Bot_Este
7	Pala_1
8	Pala_2
9	Carg_1
10	Pique_1
11	Pique_2
12	Pique_3

Ilustración 31. Rutas utilizadas para la simulación.



Anexos B

Tabla 20. Resultados de la simulación para el caso base.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.9	3.5	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.7	3.3	11.8	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	46.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	7.0	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.5	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.4	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.9	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.4	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	5.3	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.4	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.1	1.6	4.2	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	2.0	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	8.2	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	14.5			

Tabla 21. Resultados de la simulación para un envío 50% menor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.4	3.3	5.7	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	23.2			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	7.0	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	1.9	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.3	3.3	3.6	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.5	2.1	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.5	3.3	3.7	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	2.7	2.2	3.0	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.8	0.0	3.7	0.4
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.6	2.0	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	5.0	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	8.1	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	14.5			

Tabla 22. Resultados de la simulación para un envío 30% menor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.0	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.4	3.3	5.6	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.3	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	32.5			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.3	1.6	6.9	1.2
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.7	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.1	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.1	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.7	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	2.8	2.6	3.1	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.9	3.6	0.4
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.0	0.2
	Descargas por hora	4.0			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	4.3	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.9	2.1	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.7	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.3	2.6	7.6	1.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	14.5			

Tabla 23. Resultados de la simulación para un envío 20% menor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.7	3.3	13.0	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.3	4.0	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	46.2			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	1.8	1.6	4.4	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.5	3.5	0.4
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	8.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	2.9	0.3
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.5			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.0	2.6	5.1	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.9	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.0	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	4.4	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	3.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.6	0.1
	Descargas por hora	4.7			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	2.9	2.6	6.0	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			

Tabla 24. Resultados de la simulación para un envío 10% menor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	11.6	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	41.5			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	6.8	1.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	1.9	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.3	3.2	3.5	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.9	3.2	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.4	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.1	2.6	5.7	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.6	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.2			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.3	1.6	5.2	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	8.0	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.5	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	4.2	0.1
	Descargas por hora	14.7			

Tabla 25. Resultados de la simulación para un envío 10% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.3	0.2
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.7	3.3	13.4	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.3	4.7	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	51.0			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.1	1.6	6.0	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.1	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.3	3.2	3.4	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.4	4.0	0.1
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.4	2.6	5.8	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.4	4.3	0.7
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.0	0.2
	Descargas por hora	6.5			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	4.5	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.9	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.3	2.6	7.3	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	14.5			

Tabla 26. Resultados de la simulación para un envío 20% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.2	0.2
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.9	3.3	13.3	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.2	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	55.8			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	5.8	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.6	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.3	0.1
	Descargas por hora	10.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.3	3.2	3.6	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	3.3	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	3.9	0.2
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	6.2	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	4.6	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	6.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.1	1.6	4.1	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.9	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.7	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	7.1	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	14.5			

Tabla 27. Resultados de la simulación para un envío 30% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.2	0.3
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.0	0.1
	Descargas por hora	11.2			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.9	3.3	13.9	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	5.7	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.1	3.2	0.2
	Descargas por hora	58.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	5.5	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.5	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.1	0.1
	Descargas por hora	10.3			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.3	3.3	3.5	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	2.2	3.3	0.3
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	6.1	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.9	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	7.3			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.1	1.6	4.2	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	3.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	5.7			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.3	2.6	8.3	1.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	4.1	0.1
	Descargas por hora	14.0			

Tabla 28. Resultados de la simulación para un envío 50% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	10.3			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	4.8	3.3	28.6	1.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.4	5.1	0.7
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.5	0.2
	Descargas por hora	61.7			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.4	1.6	8.3	1.4
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.2	0.1
	Descargas por hora	9.5			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.4	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.6	2.1	3.2	0.3
	Tiempo vuelta (min)	3.5	3.3	3.7	0.1
	Descargas por hora	2.2			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	4.5	2.6	10.8	1.9
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	5.0	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.2	0.2
	Descargas por hora	7.7			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.0	1.6	3.8	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	2.0	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.4	2.8	0.1
	Descargas por hora	5.2			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.8	2.6	10.6	2.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	12.8			

Tabla 29. Resultados de la simulación para un envío 70% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.0	0.2
	Descargas por hora	9.2			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	14.2	3.3	90.9	11.4
	Tiempo descarga (min)	3.1	1.3	16.5	1.1
	Tiempo vuelta (min)	2.8	2.2	13.4	1.0
	Descargas por hora	57.8			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	2.6	1.6	7.3	1.5
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.6	0.4
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.6	2.2	0.1
	Descargas por hora	8.5			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.5	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.6	2.0	3.4	0.3
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.4	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.0			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	12.8	2.6	41.4	11.0
	Tiempo descarga (min)	3.0	1.5	6.6	0.9
	Tiempo vuelta (min)	2.2	1.4	17.9	2.5
	Descargas por hora	7.0			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.7	1.6	8.1	1.6
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.8	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	4.7			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	7.6	2.6	27.2	6.3
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	9.3	3.5	31.4	7.4
	Descargas por hora	8.3			

Tabla 30. Resultados de la simulación para un envío 100% mayor al chancador de estéril.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	5.3	5.2	18.6	3.7
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	4.7	2.4	13.0	3.0
	Descargas por hora	8.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	39.9	3.3	119.8	21.2
	Tiempo descarga (min)	3.2	1.4	17.7	1.4
	Tiempo vuelta (min)	3.8	2.1	23.5	2.5
	Descargas por hora	52.0			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	9.6	1.6	34.2	8.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.6	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.4	1.5	10.4	1.5
	Descargas por hora	8.2			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	9.3	9.2	31.1	8.4
	Tiempo descarga (min)	2.4	1.8	2.9	0.3
	Tiempo vuelta (min)	1.8	3.4	23.8	7.5
	Descargas por hora	1.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	40.2	2.7	73.4	20.3
	Tiempo descarga (min)	3.1	1.5	6.6	0.8
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	3.6	0.4
	Descargas por hora	7.3			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	10.4	1.6	33.9	11.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.8	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	6.5	2.4	26.1	5.7
	Descargas por hora	4.0			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	10.3	2.6	29.9	7.5
	Tiempo descarga (min)	2.8	2.1	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	34.9	3.6	55.5	14.9
	Descargas por hora	5.2			

Anexo C

Ilustración 32. Análisis de sensibilidad de Ruta 1.

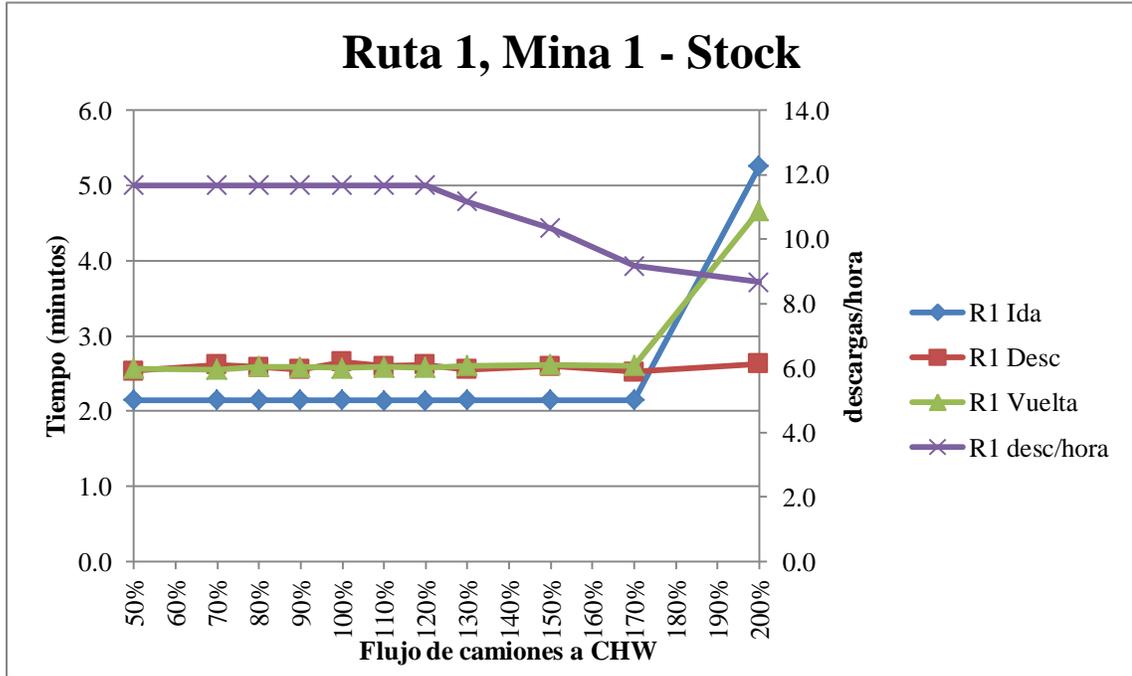


Ilustración 33. Análisis de sensibilidad de Ruta 2.

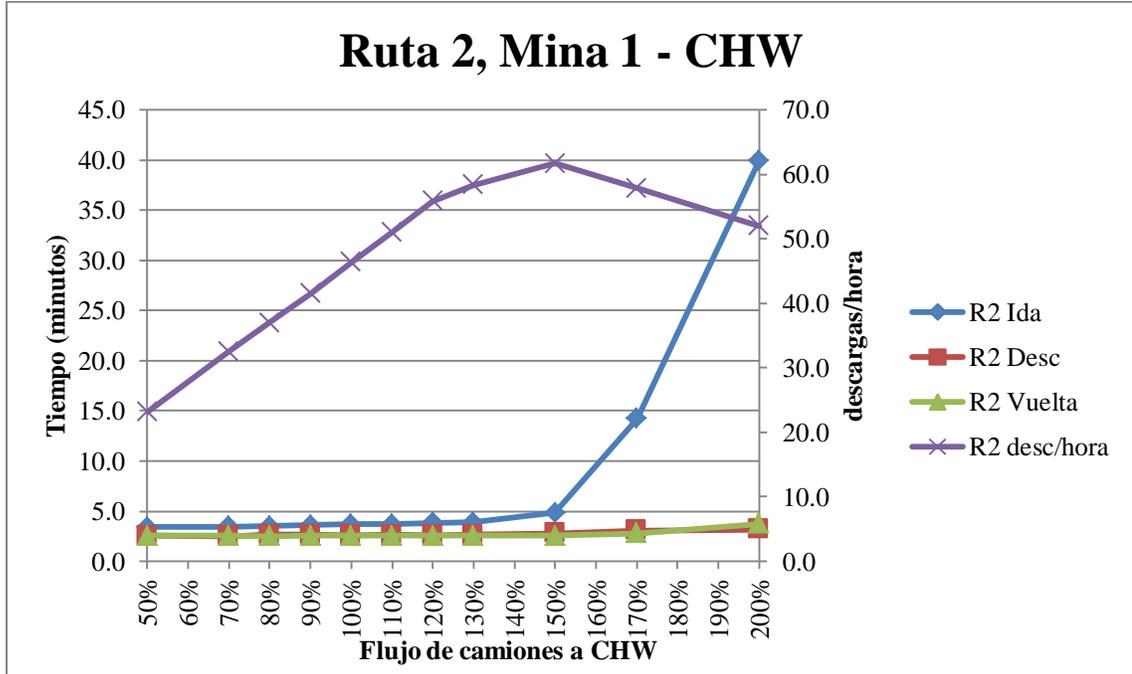


Ilustración 34. Análisis de sensibilidad de Ruta 3.

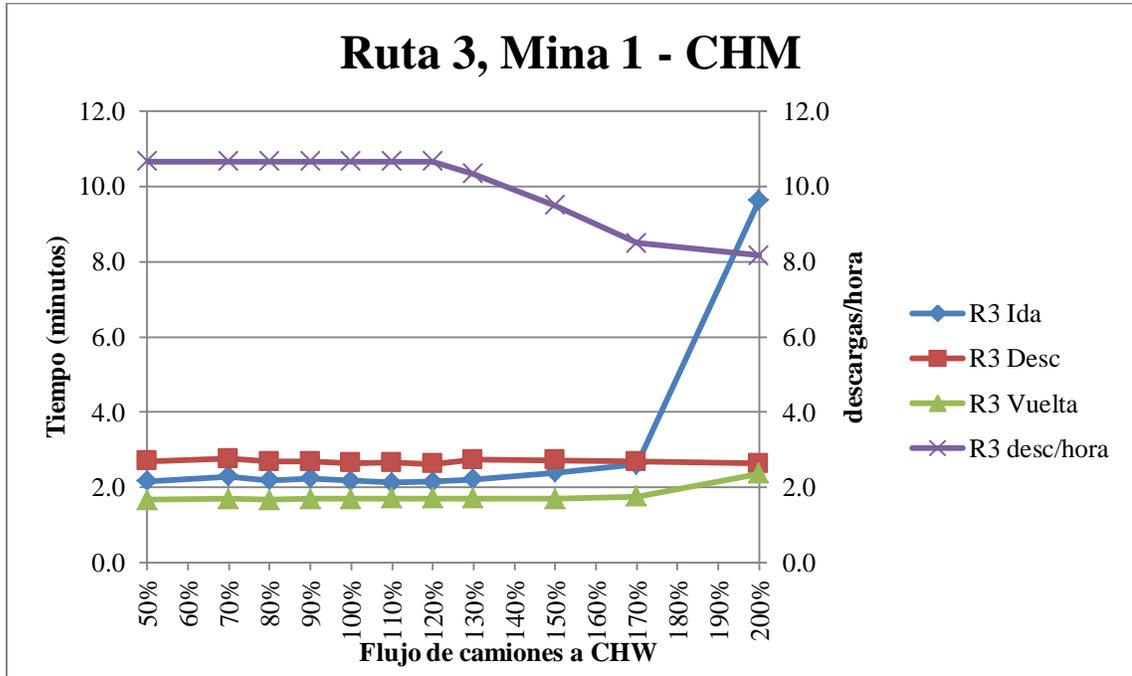


Ilustración 35. Análisis de sensibilidad de Ruta 7.

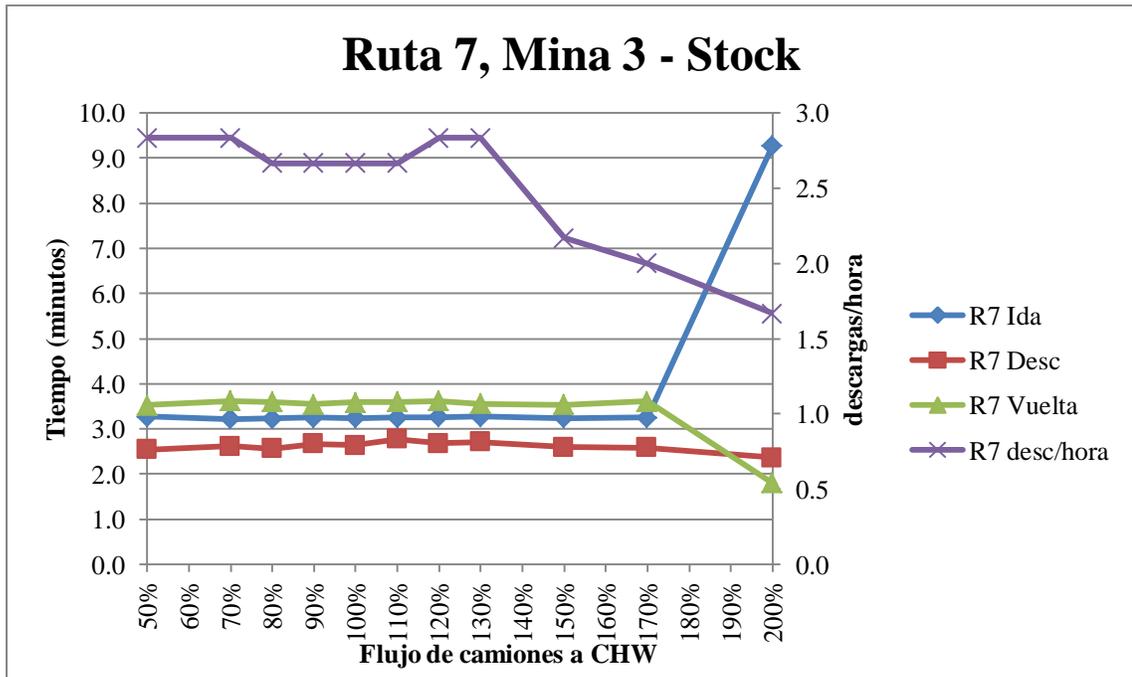


Ilustración 36. Análisis de sensibilidad de Ruta 8.

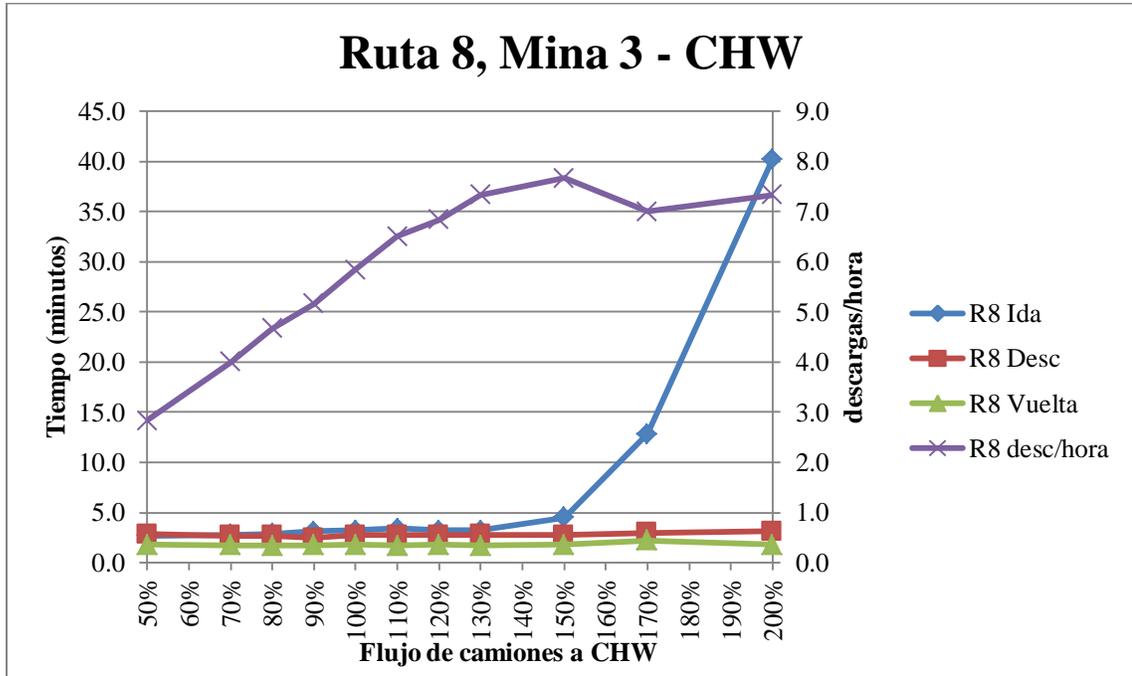


Ilustración 37. Análisis de sensibilidad de Ruta 9.

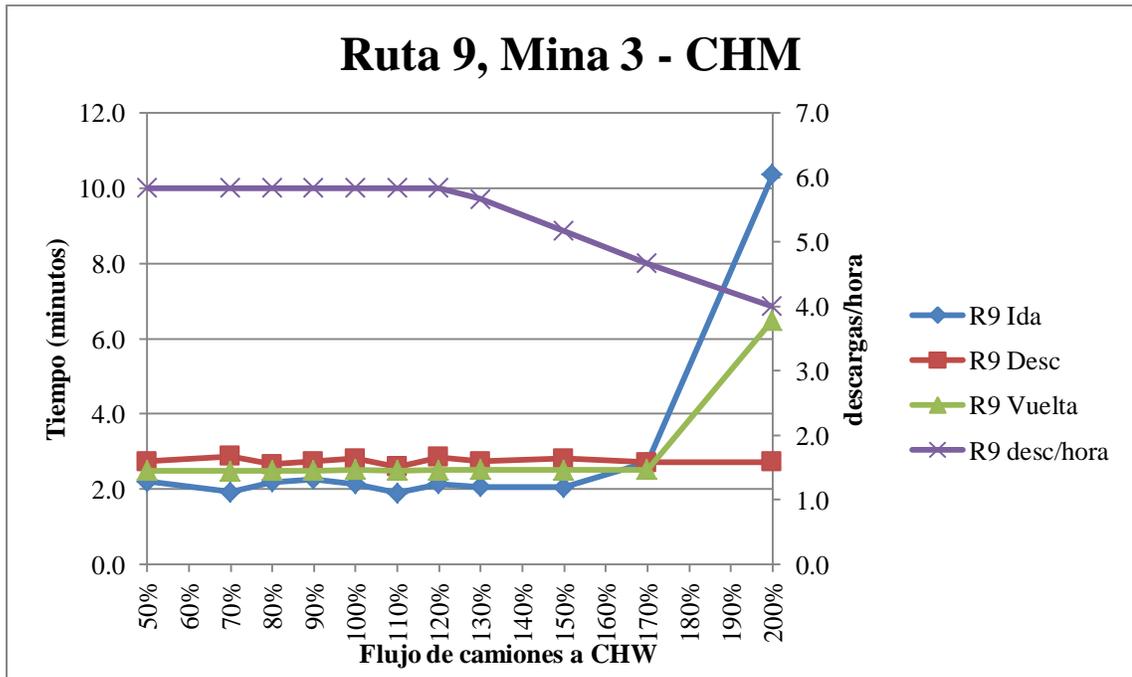
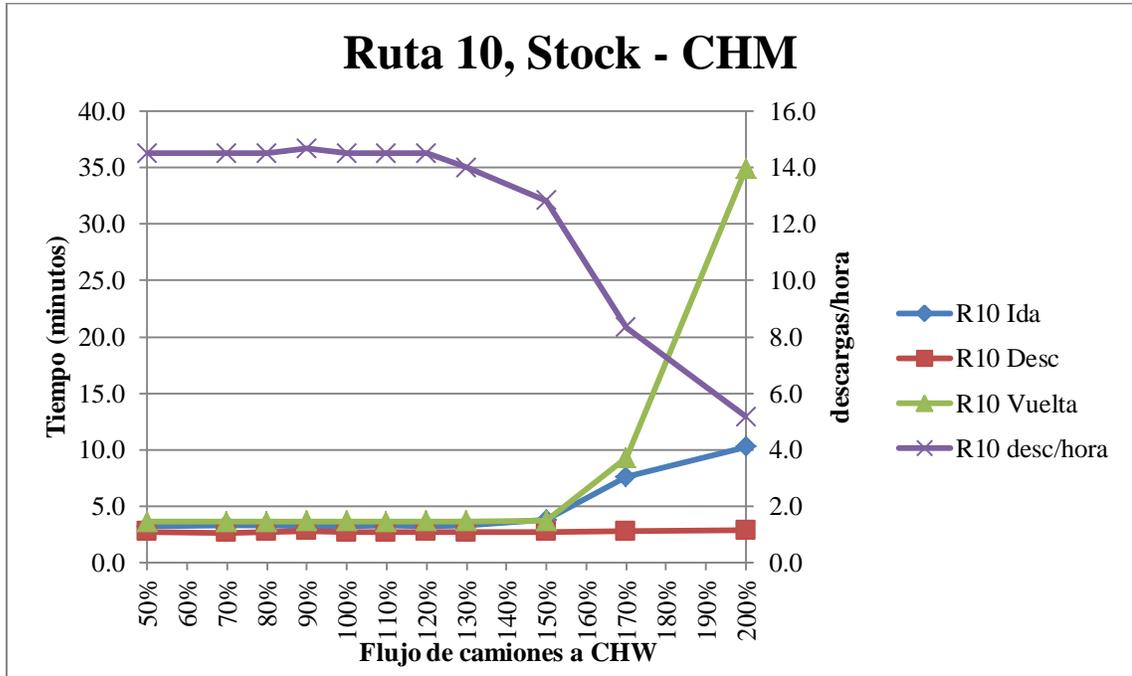


Ilustración 38. Análisis de sensibilidad de Ruta 10.



Anexo D

Tabla 31. Resultados de la simulación para un envío 50% menor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.8	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	11.6	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.6	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	46.2			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	1.7	1.6	2.8	0.2
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.7	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	5.3			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.5	3.4	3.9	0.1
	Descargas por hora	2.2			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	5.8	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.5	4.6	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.0	0.1
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.0	1.6	4.4	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.9	1.7	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	2.8	2.6	4.4	0.3
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.8	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	7.3			

Tabla 32. Resultados de la simulación para un envío 30% menor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.5	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	10.6	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.3	6.0	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	46.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	4.4	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	7.5			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.1	3.4	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.9	3.5	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.5	3.3	3.8	0.1
	Descargas por hora	2.8			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	5.1	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.8	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	1.8	1.6	3.2	0.3
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.7	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.7	0.1
	Descargas por hora	4.0			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	2.9	2.6	5.1	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.5	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	10.2			

Tabla 33. Resultados de la simulación para un envío 20% menor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	10.6	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	46.5			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	5.4	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	9.5			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.3	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	4.0	0.2
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.1	2.6	5.5	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.6	0.7
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	5.8	1.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.7	0.1
	Descargas por hora	5.2			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.1	2.6	6.7	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.5	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	13.2			

Tabla 34. Resultados de la simulación para un envío 10% menor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	2.9	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	10.6	0.4
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	46.5			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	1.9	1.6	5.4	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	9.5			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.3	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	4.0	0.2
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.1	2.6	5.5	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.6	0.7
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	2.2	1.6	5.8	1.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.7	0.1
	Descargas por hora	5.2			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	3.1	2.6	6.7	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.5	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	13.2			

Tabla 35. Resultados de la simulación para un envío 10% mayor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.1	0.2
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.7	3.3	11.9	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.2	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.1	0.2
	Descargas por hora	46.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	3.1	1.6	8.4	1.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.0	0.1
	Descargas por hora	11.8			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.3	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.8	3.3	0.4
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	3.9	0.2
	Descargas por hora	2.5			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.2	2.6	5.7	0.8
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.6	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.3	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	3.1	1.6	8.9	2.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.8	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	6.5			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	4.0	2.6	11.9	2.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.5	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	4.0	0.1
	Descargas por hora	15.8			

Tabla 36. Resultados de la simulación para un envío 20% mayor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.5	1.7	3.4	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.0	0.2
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.6	3.3	12.0	0.5
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.4	4.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.1	3.0	0.2
	Descargas por hora	46.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	3.5	1.6	11.7	2.0
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.8	3.7	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.2	0.1
	Descargas por hora	12.7			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	3.2	3.2	3.4	0.1
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.7	3.4	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	2.5			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.5	2.6	5.7	0.9
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.5	3.5	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.1	0.2
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	3.3	1.6	7.8	2.0
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	2.8	0.1
	Descargas por hora	7.0			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	4.3	2.6	11.7	2.1
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.5	3.9	0.1
	Descargas por hora	17.5			

Tabla 37. Resultados de la simulación para un envío 30% mayor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.1	2.1	2.2	0.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.9	3.5	0.4
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.0	0.1
	Descargas por hora	11.7			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	3.7	3.3	14.1	0.7
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.3	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	2.1	10.8	1.9
	Descargas por hora	46.3			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	11.4	1.6	23.3	6.3
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.6
	Tiempo vuelta (min)	1.7	1.5	2.2	0.1
	Descargas por hora	12.8			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	9.3	9.2	26.8	8.4
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.7	3.5	0.6
	Tiempo vuelta (min)	3.6	3.3	3.7	0.1
	Descargas por hora	2.2			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	3.3	2.6	8.0	1.0
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	4.0	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.4	2.7	0.3
	Descargas por hora	5.8			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	10.2	1.6	21.5	5.4
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.9	0.6
	Tiempo vuelta (min)	2.5	2.3	3.5	0.2
	Descargas por hora	6.0			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	15.5	2.6	38.1	10.3
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.5	3.9	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.7	3.5	5.8	0.4
	Descargas por hora	17.7			

Tabla 38. Resultados de la simulación para un envío 50% mayor al chancador de mineral.

		Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Ruta 1	Tiempo ida (min)	2.3	2.3	5.5	0.6
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.9	4.3	0.5
	Tiempo vuelta (min)	2.6	2.4	3.4	0.2
	Descargas por hora	11.3			
Ruta 2	Tiempo ida (min)	6.8	3.3	81.3	7.3
	Tiempo descarga (min)	3.1	1.4	12.8	1.4
	Tiempo vuelta (min)	19.3	2.1	63.2	14.7
	Descargas por hora	39.0			
Ruta 3	Tiempo ida (min)	15.5	1.6	29.9	5.9
	Tiempo descarga (min)	2.7	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	1.8	1.5	3.4	0.3
	Descargas por hora	14.0			
Ruta 7	Tiempo ida (min)	37.4	37.3	105.8	59.2
	Tiempo descarga (min)	2.6	2.5	2.7	0.1
	Tiempo vuelta (min)	7.0	3.5	14.0	6.1
	Descargas por hora	0.5			
Ruta 8	Tiempo ida (min)	28.2	2.6	111.3	35.7
	Tiempo descarga (min)	3.9	1.6	19.0	6.6
	Tiempo vuelta (min)	7.8	1.6	28.1	9.6
	Descargas por hora	2.7			
Ruta 9	Tiempo ida (min)	40.5	1.6	111.9	36.2
	Tiempo descarga (min)	2.6	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	3.0	2.4	7.0	1.2
	Descargas por hora	4.0			
Ruta 10	Tiempo ida (min)	42.6	2.6	96.5	25.6
	Tiempo descarga (min)	2.8	1.6	3.8	0.5
	Tiempo vuelta (min)	7.7	6.5	56.3	10.3
	Descargas por hora	13.2			

Anexo E

Ilustración 39. Análisis de sensibilidad de Ruta 1.

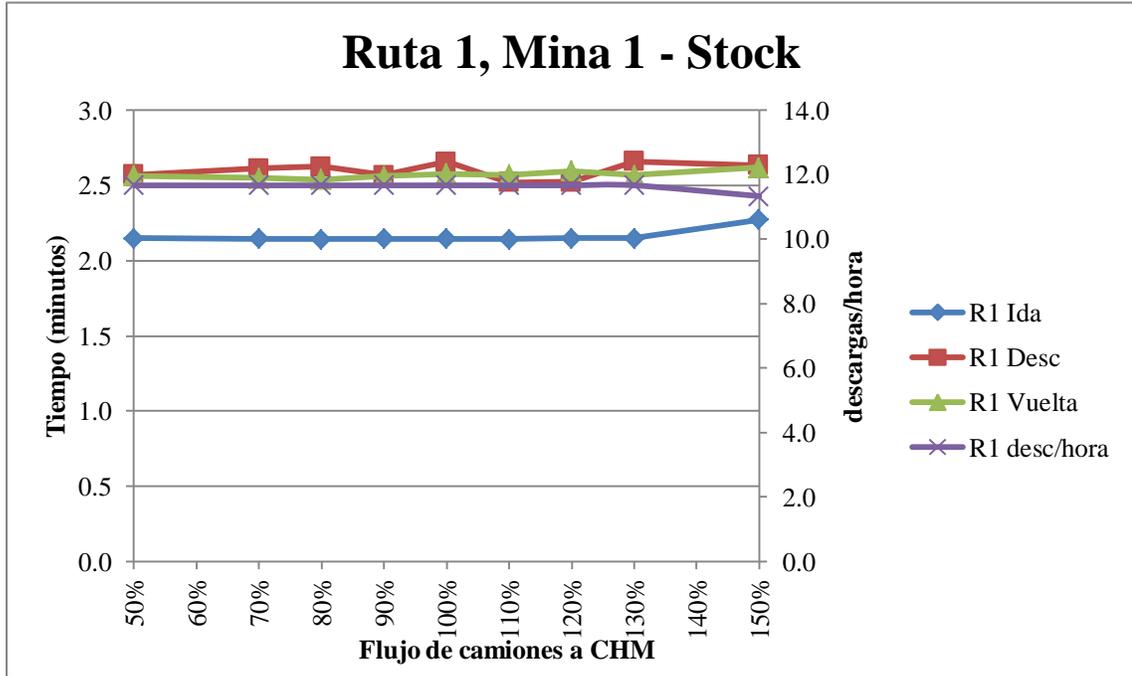


Ilustración 40. Análisis de sensibilidad de Ruta 2.

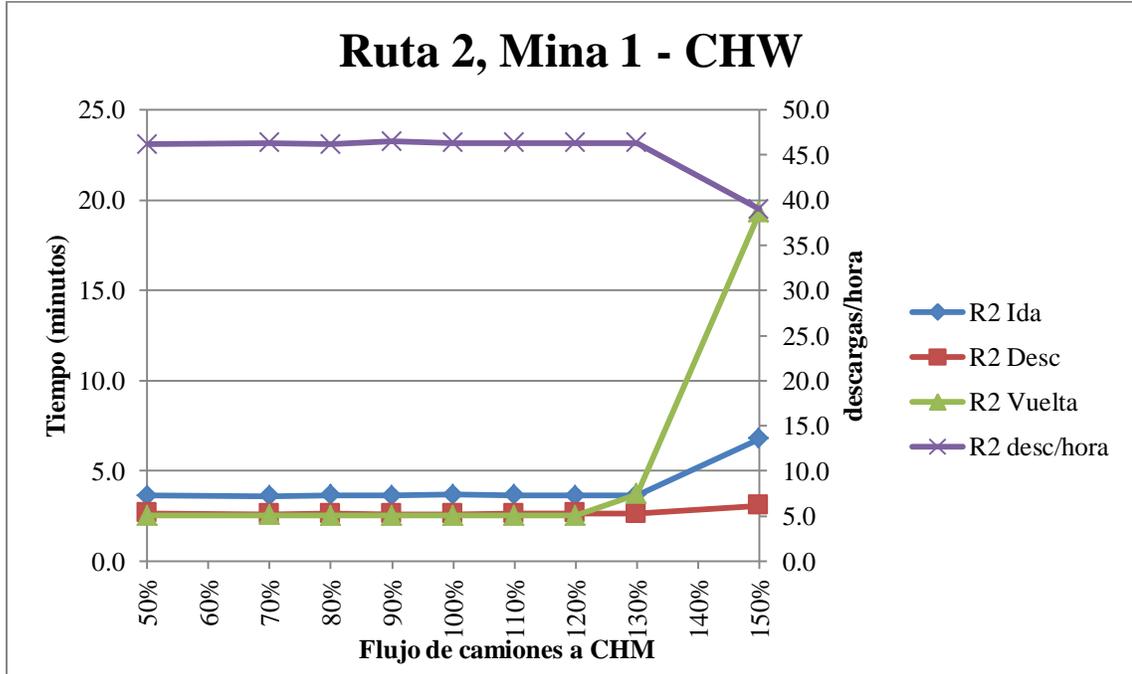


Ilustración 41. Análisis de sensibilidad de Ruta 3.

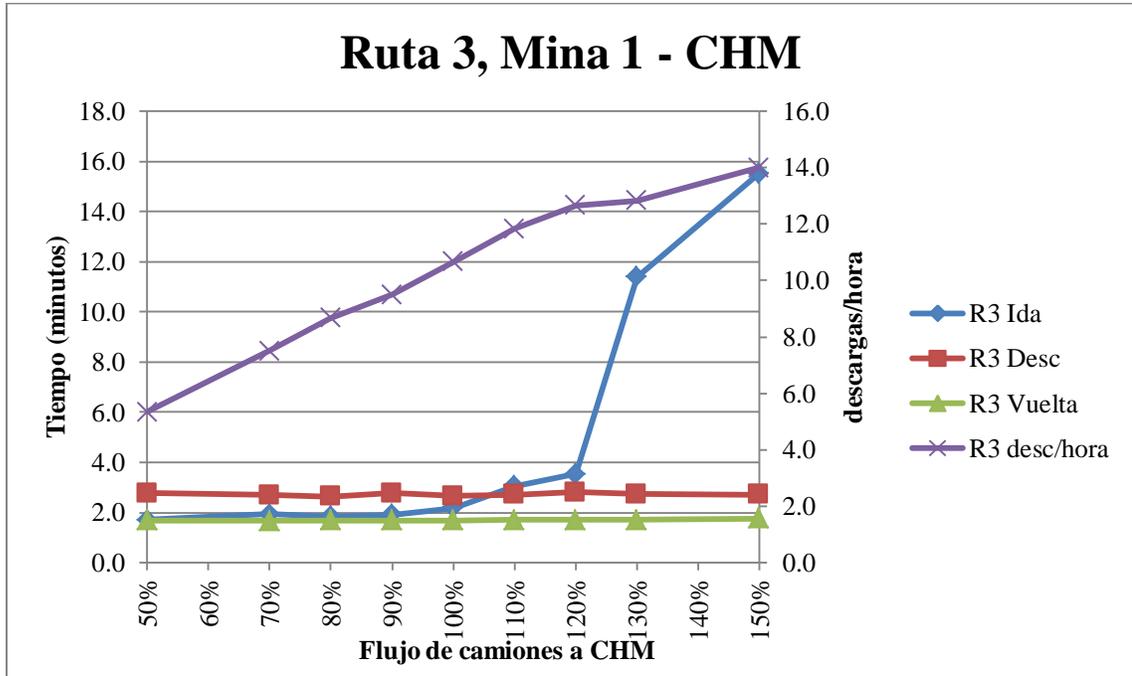


Ilustración 42. Análisis de sensibilidad de Ruta 7.

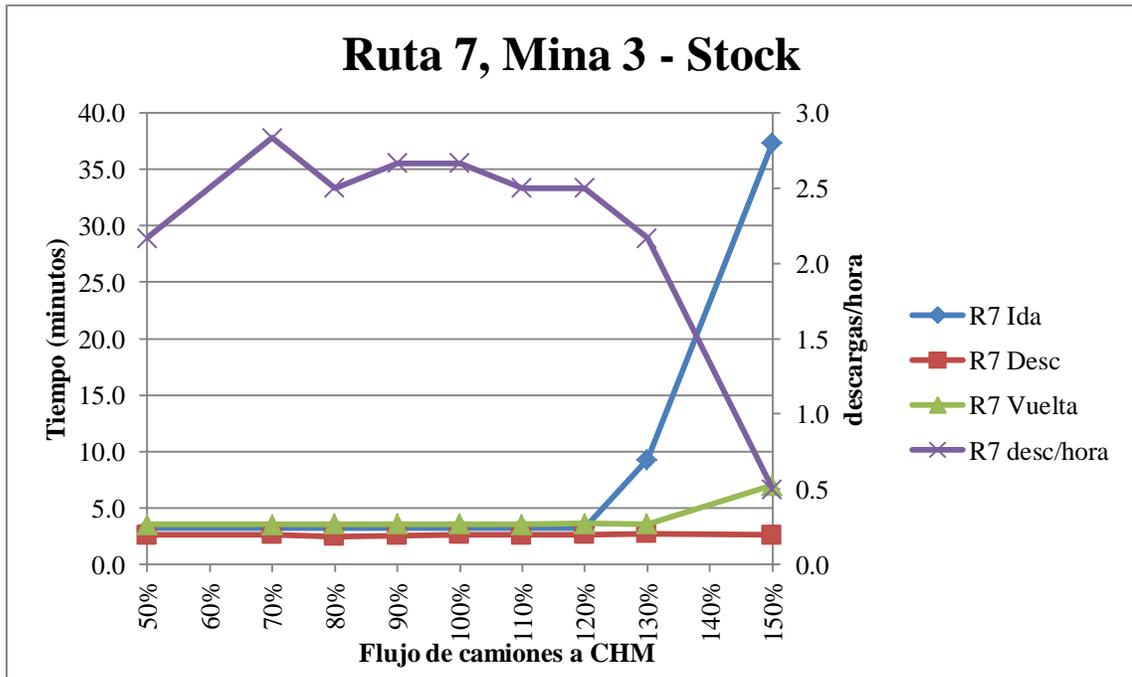


Ilustración 43. Análisis de sensibilidad de Ruta 8.

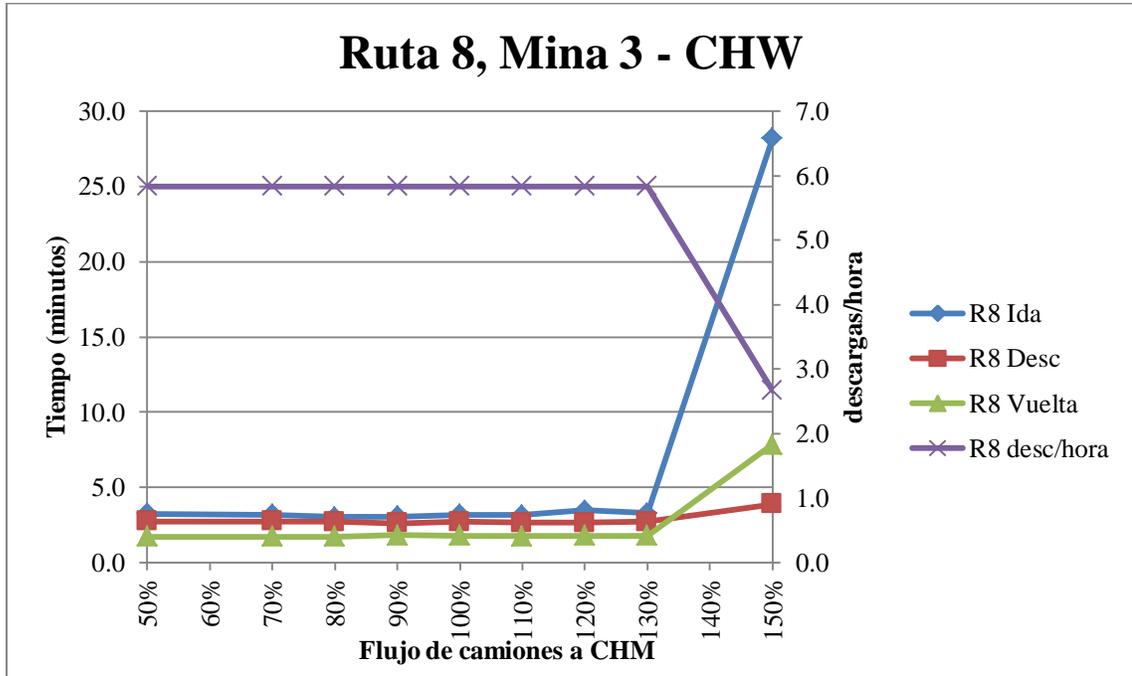


Ilustración 44. Análisis de sensibilidad de Ruta 9.

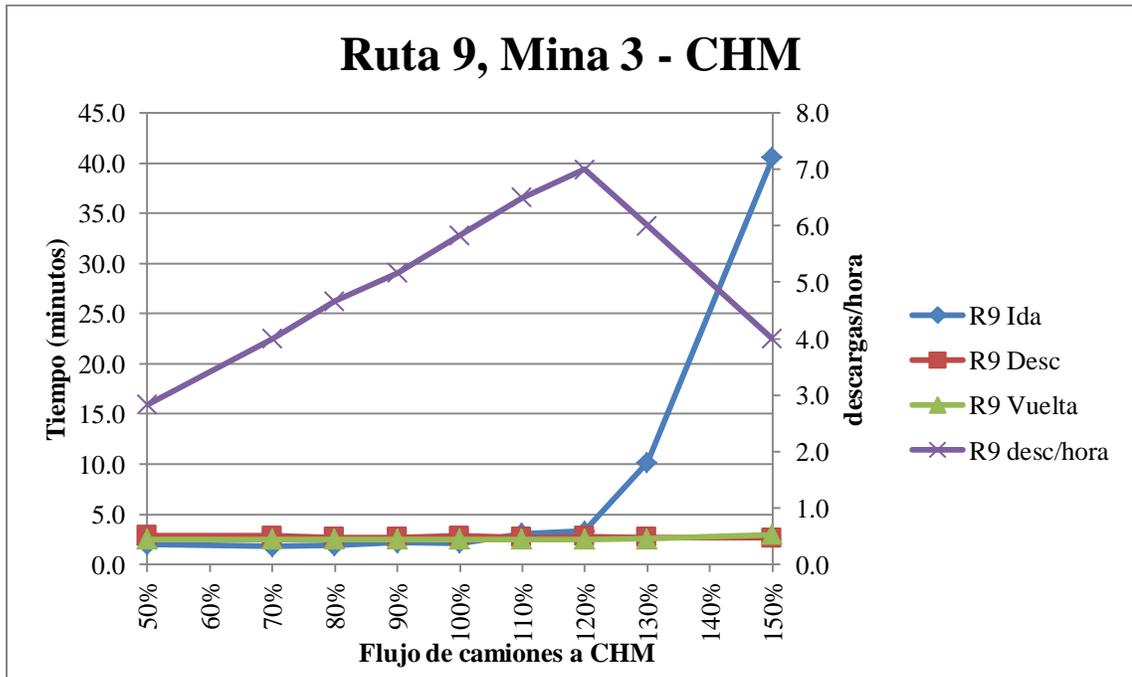


Ilustración 45. Análisis de sensibilidad de Ruta 10.

