

# Loading-Haulage System Assessment using Discrete Event Simulation

Medina Veintimilla Xavier Andrés<sup>1</sup>, Vásquez Castellano Javier Andrés<sup>1</sup>, Noriega Moscoso Roberto <sup>2</sup>, Moreno-Chavez Jose <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, xmedina@espol.edu.ec, javavasq@espol.edu.ec, josmoren@espol.edu.ec

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada, noriega@ualberta.ca

*Abstract -- This research presents an optimal number of dumpers and shovels that should be designated to each front of a quarry using discrete event simulation as a tool for the evaluation of all possible scenarios and present the optimal ones. The open pit mine where the investigation took place does not have a loading-haulage system by software. The company performs its mine planning using mathematical methods to exploit two fronts simultaneously per day using a fleet of seven dump trucks and three shovels. Probabilistic distributions were used based on data collected in the field to simulate the model in the Arena Input Analyzer. In addition, an analysis of the internal network track of the mine was carried out in order to simulate the movement of the mining trucks in the haul cycle, thus considering a variation of the process in each cycle. The results of the simulation showed that, of the 140 scenarios evaluated, 14 of them are optimal.*

*Keywords – Discrete event simulation, Arena, Distribution, System, Haulage, Mining.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.164>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Evaluación del Sistema de Carguío y Acarreo usando Simulación por Eventos Discretos

Medina Veintimilla Xavier Andrés<sup>1</sup>, Vásquez Castellano Javier Andrés<sup>1</sup>, Noriega Moscoso Roberto<sup>2</sup>, Moreno-Chavez Jose<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Campus Gustavo Galindo Km. 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador, xmedina@espol.edu.ec, javavasq@espol.edu.ec, josmoren@espol.edu.ec

<sup>2</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Canada, noriega@ualberta.ca

**Resumen:** Esta investigación presenta un número óptimo de volquetes mineros y excavadoras que debe ser designado a cada frente de explotación de una cantera la simulación por eventos discretos como herramienta para la evaluación de todos los escenarios posibles y presentar los óptimos. La mina a cielo abierto donde tuvo lugar la investigación no posee un sistema de carga y transporte mediante software. La empresa realiza la planificación minera usando métodos matemáticos para explotar material de dos frentes simultáneamente por día con una flota de siete volquetes y tres excavadoras. Se usaron distribuciones probabilísticas en base a datos recolectados en campo para simular el modelo en el software Arena. Además, se realizó un análisis de las vías internas de la mina con la finalidad de simular el movimiento de los volquetes mineros en el ciclo de acarreo, considerando así una variación del tiempo del proceso en cada ciclo. Los resultados de la simulación mostraron que, de los 140 escenarios evaluados, 14 de ellos son óptimos.

**Palabras clave:** Simulación eventos discretos, Arena, distribución probabilística, sistema, acarreo, minería.

**Abstract:** This research presents an optimal number of dumpers and shovels that should be designated to each front of a quarry using discrete event simulation as a tool for the evaluation of all possible scenarios and present the optimal ones. The open pit mine where the investigation took place does not have a loading-haulage system by software. The company performs its mine planning using mathematical methods to exploit two fronts simultaneously per day using a fleet of seven dump trucks and three shovels. Probabilistic distributions were used based on data collected in the field to simulate the model in the Arena Input Analyzer. In addition, an analysis of the internal network track of the mine was carried out in order to simulate the movement of the mining trucks in the haul cycle, thus considering a variation of the process in each cycle. The results of the simulation showed that, of the 140 scenarios evaluated, 14 of them are optimal.

**Keywords:** Discrete event simulation, Arena, distribution, system, haulage, mining.

## I. INTRODUCCIÓN

La simulación por eventos discretos se ha implantado como una herramienta decisiva para la evaluación de sistemas productivos (Sturgul, 2017). Las operaciones mineras al ser cíclicas, la aplicación de modelos de simulación por eventos discretos validados, permiten valorar alternativas de desarrollo con un elevado grado de confiabilidad (Dindarloo et al., 2015).

Esta investigación tomó lugar en Guayaquil, Ecuador, donde no se reportan trabajos de investigación usando la metodología propuesta. El estudio se realizó en la mina Calizas Huayco, dedicada a la explotación de materiales de construcción, caliza y carbonatos.

La mina posee un operador minero subcontratado, que se encarga de la explotación del mineral desde la perforación y voladura hasta colocar el mineral en las zonas de descarga. Las competencias del operador minero comienzan en el frente de explotación y acaban en las zonas de descarga, trituradora o escombrera.

El presente trabajo fue desarrollado con el operador minero para buscar alternativas en el sistema de carguío y acarreo del mineral desde los frentes de transporte hasta las trituradoras. El operador en la actualidad no posee un sistema de carga y transporte mediante software que permita seleccionar el número de volquetes adecuados para obtener el tonelaje de producción en base a un programa anual de extracción.

El operador minero cuenta con cinco volquetes Volvo FMX 8X4 (32 t), dos volquetes Caterpillar 773D (43 t), dos excavadoras Komatsu PC450 (2,8 m<sup>3</sup> de cazo) y una excavadora Caterpillar 336 (2,6 m<sup>3</sup> de cazo). Además, tiene dos trituradoras primarias para descargar en diferentes plantas de tratamiento, la primera se encuentra ubicada en la concesión Huayco con una capacidad de 650 t/h y la segunda ubicada en la concesión Ampliación Precón con una capacidad de 350 t/h.

La empresa minera posee ocho frentes de explotación de los cuales, seleccionan dos frentes diarios en un único turno de 10 horas efectivas. El operador minero debe

seleccionar la mejor configuración del número de equipos de transporte para cada frente. Siendo un reto probar todas las configuraciones posibles y optar siempre por las que reflejan el mayor tonelaje de producción al final del día.

Se usan dos tipos de configuración de excavadoras. La primera, una excavadora Komatsu (2,8 m<sup>3</sup> de cazo) en cada frente, manteniendo la excavadora Caterpillar (2,6 m<sup>3</sup> de cazo) en reserva. Y la segunda, dos excavadoras Komatsu (2,8 m<sup>3</sup> de cazo) en un frente específico mientras que la Caterpillar (2,6 m<sup>3</sup> de cazo) en un segundo frente. Evaluar todos los escenarios de las configuraciones de equipos de transporte posibles para las dos configuraciones de excavadora existentes representa un desafío sin un modelo del sistema de transporte.

El propósito de esta investigación es generar un modelo de simulación por eventos discretos a partir de la toma de datos en campo y aplicarlo para evaluar todos los escenarios posibles, proporcionando el número óptimo de equipos de transporte para cada frente de explotación en la cantera.

Se realiza además un estudio de la red vial de la cantera, obteniendo factores de reducción de velocidad por tramos con pendientes similares. La finalidad es simular el transporte de los equipos de una manera más acercada a la realidad. Se obtuvo una base de datos significativa por parte del operador minero de las velocidades de los equipos de transporte con carga y sin carga.

El software Arena Input Analyzer permite obtener un modelado dinámico de los sistemas (Cetin et al. 2001). El modelo construido debe guardar una lógica acorde a los procesos efectuados en el sistema, además de ser cíclicos. En la Fig. 1 se muestra la lógica del modelo.

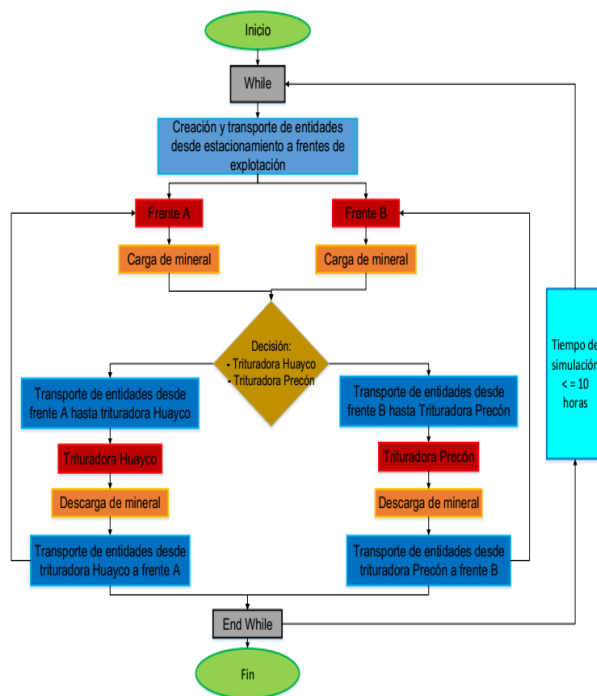


Fig. 1 Representación lógica del modelo creado.

#### A. Trabajos relacionados

La simulación por eventos discreto ha sido aplicada en diferentes países para la evaluación y optimización de las operaciones como es el caso del sistema de carga y transporte que representan entre el 50-60% de costo de producción (Tiile et al., 2016). A continuación, se muestran algunos estudios realizados por la simulación de eventos discretos.

El estudio realizado por Cetin et al. (2001) tuvo como objetivo la optimización del sistema de transporte mediante un lenguaje de simulación conocido, GPSS/H. Los datos fueron analizados mediante el software estadístico Goodness of Fit Test con Minitab, el modelo de simulación desarrollado se ejecuta cambiando el número de camiones para productividad máxima de la pala. Los resultados mostraron que la mejor política de operación para la zona de carga es utilizar una flota de 5 camiones con respecto a la productividad de la excavadora.

Cuatro años después Dindarloo et al. (2015) reporta el caso de la mina Golegozar, una mina que se dedica a la explotación de hierro y oro ubicada en el sur de Irán. Para probar el marco de la simulación, recopilaron los datos necesarios de la logística de cada operación minera seguidos del análisis estadístico para obtener la distribución probabilística para cada conjunto de datos. Seguido con la construcción del modelo de simulación, así como su validación y verificación. El resultado de la simulación muestra una optimización del 10% en la

producción con el uso de 2 excavadoras y 22 volquetes teniendo una producción de 9,5 Mt anuales que no es la mínima producción requerida por la mina.

Un estudio realizado por Tiile et al. (2016) muestra el análisis del sistema de acarreo mediante la simulación de eventos discretos con el software Arena. Los resultados de la simulación mostraron que la empresa puede realizar sus operaciones mineras de manera óptima usando 2 excavadoras con 13 camiones que en comparación al anterior sistema donde se utilizaban 17 camiones para el mismo volumen.

A diferencia de los trabajos mencionados en esta sección, este estudio tiene como objetivo analizar el sistema de carguío y acarreo en la cantera Caliza Huayco, teniendo en consideración la red vial de la mina que es elaborada en base a la topografía proporcionada por la compañía.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se dividió en tres fases. En la primera fase se determinó el problema a estudiar y se creó el sistema de flujo productivo de la mina. Luego en la segunda fase, se recolectaron los tiempos de los procesos en la carga y descarga del mineral. Además, se recolectó una base de datos sobre las velocidades de los volquetes cargados y descargados.

En la tercera fase se analizaron los datos tomados en campo utilizando el software Arena Input Analyzer para obtener distribuciones probabilísticas de los procesos. Se realizó un análisis de las vías obteniendo un factor de reducción de velocidad por cada tramo con pendiente equivalente para ingresar al modelo de simulación (Upadhyay, 2016).

Luego, se construyó el modelo de simulación guardando la lógica del ciclo de producción e ingresando las distribuciones y factores de reducción de velocidad de la red vial. Creando el modelo que se usará como herramienta para evaluar escenarios.

La construcción del modelo continuó con la verificación de la lógica matemática y de los datos ingresados que fueran los correctos, asegurándose que el modelo cumpla con las secuencias y las distribuciones probabilísticas del sistema real (Castro, 2011).

Finalmente, todos los escenarios se evaluaron en el modelo. Se seleccionaron los escenarios óptimos y se realizaron conclusiones.

Se definen escenarios óptimos a la configuración de frentes donde producto de la evaluación en la simulación, el tonelaje, fue superior al resto de escenarios para misma configuración.

### A. Toma de datos de carga, descarga y transporte

La toma de datos en campo se realizó en jornadas de trabajo de cinco horas al día durante un mes. Se realizó la

toma de datos en los frentes de explotación y en las zonas de descarga.

En la carga, se separó el proceso en varios procesos unitarios: tiempo de posicionamiento de volquete, probabilidad de espera de pala, tiempo de espera de pala, tiempo de palada y número de paladas.

La espera de pala no se asoció al tiempo que el volquete espera en una fila mientras otro es cargado, sino al tiempo en que el volquete preparado para ser cargado espera a la pala a que realice una espera debido a tiempo homogenización del mineral en frente, paradas inesperadas del operador, etc.

En la descarga en trituradoras, de igual manera el proceso se separó en procesos unitarios: tiempo de posicionamiento de volquete, probabilidad de espera de trituradora, tiempo de espera de trituradora, tiempo de descarga.

De igual manera, la espera de trituradora no se asoció al tiempo que espera el volquete en fila, sino al tiempo en que el volquete preparado para descargar espera la autorización del operador de trituradora para realizar el proceso de descarga. Esta espera se asocia al congestionamiento del mineral en la trituradora, atascos en procesos posteriores a la trituración y paradas innecesarias del operador de trituradora.

Se recolectó una base de datos recaudada por el dispositivo GPS instalado en los volquetes. Esta base de datos brindó las velocidades de los volquetes cargado y descargados.

### B. Análisis de datos de carga, descarga y transporte.

Los datos recolectados se filtraron por categorías. Para la carga se realizaron suposiciones para filtrar los datos:

- i) El posicionamiento del volquete en la pala fue independiente del frente y de la pala, fue únicamente dependiente del espacio para la maniobra del volquete. En todos los frentes se evidenció un espacio similar y amplio para realizar la maniobra.
- ii) La probabilidad de espera y tiempo de espera dependió únicamente del frente de explotación. La ligera variación de la geología, voladura y granulometría producto de esta, varió conforme al frente.
- iii) El tiempo de palada fue dependiente del tipo de excavadora.
- iv) El número de paladas fue dependiente del tipo de excavadora y del tipo de volquete en el que se realizó la carga.

Suposiciones para el proceso de descarga:

- v) El posicionamiento en trituradora fue dependiente del espacio de maniobra del volquete. En ambas trituradoras se evidenció un espacio similar y amplio por lo que el tipo de trituradora no influyó.

vi) La probabilidad de espera y tiempo de espera en trituradora fue dependiente exclusivamente del tipo de trituradora. Debido que la capacidad de la primaria (650 t/h) es casi el doble que la primaria (350 t/h), sus probabilidades y distribuciones son distintas.

vii) El tiempo de descarga en trituradora fue dependiente del tipo del volquete. Esto debido a la capacidad de cada uno 32 t y 43 t.

Para el transporte del mineral se filtraron en dos categorías, con carga y sin carga. Para luego ser analizadas.

Luego de tener los datos filtrados por categorías se procedió a analizar el tamaño mínimo de datos requeridos para tener una confiabilidad del 95% y un error admisible del 10% en función de la desviación estándar de los datos. Si la categoría no cumplía, se descartaba.

En este punto, se procedió a ingresar las categorías al Arena Input Analyzer y encontrar la distribución probabilística que mejor se ajustaba. Se aseguró de que se tome la distribución con el menor error al cuadrado y que las pruebas de bondad de ajuste p-value sean mayor a 0,05. Reiterando que, si no cumplían estas condiciones, se rechazaban (Ver Tablas I, II y III).

Tabla I  
Distribuciones probabilísticas tiempo de posicionamiento en la zona de carga y descarga.

	Expresión	#min data	#data
Carga	Volvo FMX	12 + WEIB (32.9,2.33)	17
	CAT 773D	TRIA(13.31.3, 67)	45
	Volvo FMX	NORM(33.7, 5.57)	16
Descarga	CAT 773D	19 + 31 * BETA(7.07, 10.2)	6

Tabla II  
Distribuciones probabilísticas de los tiempos de carga y descarga.

	Expresión	#min datos	#datos
Zona Carga	Komatsu PC450	17 + 8 * BETA(0.935, 1.36)	91
	CAT 336	17 + 8 * BETA(0.877, 1.31)	49
	Volvo FMX	NORM(46.6, 7.41)	127
Zona Descarga	CAT 773D	25 + LOGN(9.26, 7.41)	76

Tabla III  
Distribuciones de las velocidades con carga y sin carga del volquete Volvo FMX.

	Expresión	#min datos	#datos
Con carga	NORM(6.37, 1.95)	44	385
Sin carga	4 + 10 * BETA(1.5, 2.46)	83	318

### C. Análisis de la red vial

Para la obtención factor de reducción de velocidad (k) que se añadió a la red vial de la simulación, se partió de la topografía de la mina, asociando tramos con gradientes semejantes. De los tramos se obtuvieron intersección inicial y final del tramo, longitud y gradiente. La gradiente implicó una resistencia al volquete a transitar por un tramo. Cada tramo implicó tener una resistencia a la gradiente distinta.

Además, la calidad de las vías de transporte implicó una resistencia a la rodadura a las llantas del volquete. Esta resistencia se obtuvo a partir del manual del fabricante del volquete relacionando el estado y calidad de las vías con el tipo de llantas del volquete que transita. La resistencia a la rodadura fue constante a lo largo de toda la red vial.

Por tramo de la vía, se sumaron la resistencia a la gradiente y resistencia a la rodadura para obtener, en porcentaje, la resistencia equivalente. A partir de esta, se obtuvo la velocidad máxima del volquete en el tramo y la velocidad máxima a pendiente cero. Para finalmente obtener el factor k producto del cociente de ambas velocidades.

Se obtuvieron un total de 36 intersecciones y 58 tramos de vía.

En la simulación, el factor k, reducirá la velocidad del volquete tomada de una distribución probabilística de velocidad del volquete (ver Tabla III). A semejando el comportamiento de los volquetes en la simulación a la realidad.

### D. Construcción del modelo

El modelamiento en Arena se realizó por medio del uso de diagramas de flujo y módulos de datos (Tiile et al., 2016). La lógica del modelo fue seguida por los diagramas de flujo. Los módulos de datos abarcaron la información y características de los procesos y elementos (Land & Software, 2004). Estos elementos fueron variables y recursos.

Al inicio de la simulación las entidades fueron creadas y recorrieron los módulos en orden por todo el modelo (Bedon & Omar, 2005). Las entidades del modelo del sistema de acarreo y transporte fueron los volquetes mineros de 32 t y 43 t. Las excavadoras de 2,8 m<sup>3</sup> y 2,6 m<sup>3</sup> de capacidad fueron consideradas como recursos en los frentes de explotación. Las trituradoras de 650 t/h y 350 t/h fueron considerados recursos en zonas de descarga.

Los frentes de trabajo y las zonas de descarga fueron representados por estaciones. Las intersecciones y tramos de vía fueron contenidas en el módulo de datos *network link*.

Para la construcción del modelo se realizaron algunas consideraciones:

- i. La simulación se realizó por 10 horas efectivas.
- ii. Las entidades y recursos contaron con una disponibilidad del 100%.
- iii. Los datos se recolectaron en período seco.
- iv. La resistencia a la rodadura fue constante en toda la red vial.
- v. Las velocidades de los volquetes de 32 t fue igual que los volquetes de 43 t. Debido a que no existió una base de datos de volquetes de 43 t.
- vi. Las unidades disponibles fueron cinco volquetes de 32 t (Volvo Fmx 8x4) y dos volquetes de 43 t (Caterpillar 773D).
- vii. Existieron dos unidades de excavadoras Komatsu pc450 (2,8 m<sup>3</sup>) y una unidad de excavadora Caterpillar 336 (2,6 m<sup>3</sup>).
- viii. Existieron cinco frentes de explotación. Únicamente el frente #5 descargó en la trituradora primaria (350 t/h), el resto descargó en la primaria (650 t/h).
- ix. Los volquetes fueron llenados en la totalidad de su capacidad.

El modelo de simulación inició con la creación de las entidades en el módulo *crear* en el estacionamiento. Pasaron a través del módulo *asignar* donde le son otorgados atributos para identificar el tipo de volquete y el frente al que se dirigieron. Luego en el módulo *allocate* fueron colocados en un transportador en el estacionamiento de la red vial. Finalmente ingresaron al módulo *transportar* donde las entidades ingresaron a la red vial viajando por cada tramo hacia la estación en el frente de explotación (Fig. 2).

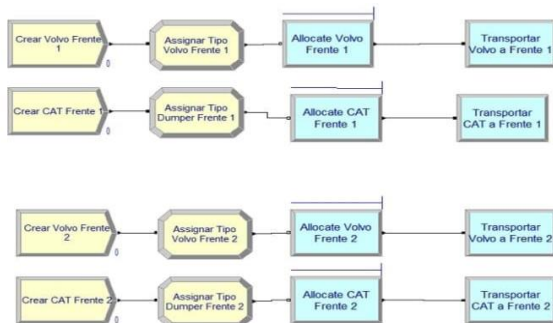


Fig. 2 Secuencia de bloques para la simulación de creación y llegada de los volquetes a sus respectivos frentes de explotación.

En el frente de trabajo, la entidad capturó un recurso de la zona de carga, ingresando al módulo *proceso* donde realiza las actividades de posicionamiento. La línea encima del módulo representó la fila que se crea detrás de la entidad que capturó al recurso.

Luego atravesó por el módulo *decisión* donde se determinó la posibilidad que exista un tiempo de espera en excavadora, en caso de que no haya existido, pasó al siguiente módulo de proceso.

A la entidad se le asignó un número de paladas en la que mediante el módulo *while* el proceso se repitió hasta que el número de paladas cargadas fue igual al número de paladas asignadas. Al finalizar el módulo *while*, la entidad liberó el recurso, atravesando luego por un contador de viajes.

Finalmente, atravesó nuevamente por el módulo *decisión* que determinó a que trituradora sería transportado. La entidad fue transportada por la red vial con una velocidad que varió en cada tramo, hasta que arribó a la zona de descarga (ver Fig. 3).

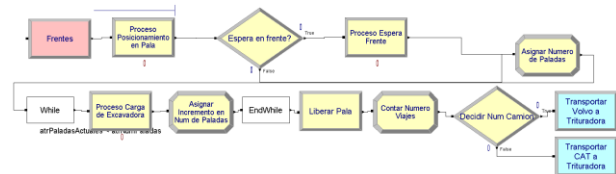


Fig. 3 Secuencia de bloques para la simulación actividades en frentes de explotación y transporte a zonas de descarga.

En el arribo a la zona de descarga la entidad capturó al recurso de la zona e inició la actividad de posicionamiento. Luego la entidad atravesó por el módulo *decisión* donde se verificó la probabilidad de espera en trituradora. En caso de no haya existido tiempo de espera, la entidad reanudó la siguiente actividad, la de descarga tomando un tiempo de la distribución definida.

Posteriormente, la entidad atravesó por un contador de producción. Finalmente, la entidad fue enviada a la red vial variando su velocidad de acuerdo con el tramo hasta arribar a la zona de carga, iniciando nuevamente el ciclo (Fig. 4).

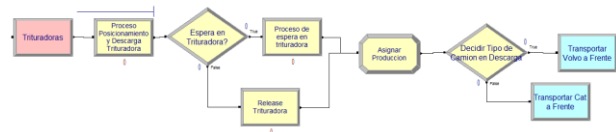


Fig. 4 Secuencia de bloques para la simulación actividades zonas de descarga y transporte a frentes de explotación.

En la simulación, la red vial fue diseñada en base a los datos mencionados en el apartado de análisis de vías. Los datos fueron ingresados a Arena donde se conectaron las intersecciones de los tramos, conteniendo la información de longitud y factor k de cada uno. Los polígonos rojos son las estaciones y los verdes son las intersecciones (Fig. 5).

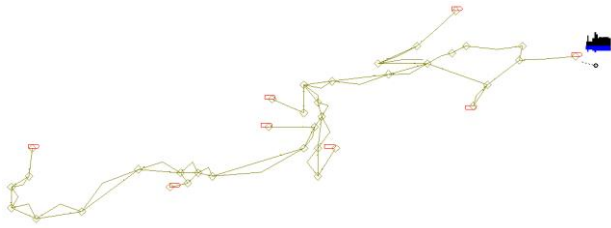


Fig. 5 Modelo de la red vial en Arena.

### III.RESULTADOS

En las Tablas IV y V se muestran las 14 combinaciones óptimas de carga y transporte de los 140 escenarios que fueron evaluados mediante el modelo de simulación.

Tabla IV  
Configuración óptima de volquetes con una excavadora en cada frente.

Esc. #	C	F	# volquetes		#Viajes a trituradora (650 t/h)	#Viajes a trituradora (350 t/h)	Tonelaje
			# volquetes	# dumper			
Esc. #10	C1	F1	1	2	191	0	6706
		F2	4	0			
Esc. #23	C2	F1	2	2	155	0	5433
		F3	3	0			
Esc. #30	C3	F1	2	1	167	0	5883
		F4	3	1			
Esc. #42	C4	F1	2	1	79	136	7551
		F5	3	1			
Esc. #60	C5	F2	3	2	184	0	6460
		F3	2	0			
Esc. #67	C6	F2	3	1	186	0	6546
		F4	2	1			
Esc. #74	C7	F2	3	0	90	134	7905
		F5	2	2			
Esc. #86	C8	F3	3	0	159	0	5583
		F4	2	2			
Esc. #98	C9	F3	3	0	70	132	7190
		F5	2	2			
Esc. #111	C10	F4	4	0	89	114	7332
		F5	1	2			

Tabla V  
Configuración óptima de volquetes con dos excavadoras en el frente #4 y una excavadora en el segundo frente.

Esc. #	C	F	# volquetes		#Viajes a trituradora (650 t/h)	#Viajes a trituradora (350 t/h)	Tonelaje
			# volquetes	# dumper			
Esc. #121	C11	F4	4	0	168	0	5937
		F1	1	2			
Esc. #130	C12	F4	2	2	167	0	5817
		F2	3	0			
Esc. #135	C13	F4	2	2	156	0	5476
		F3	3	0			
Esc. #136	C14	F4	4	0	88	102	6828
		F5	1	2			

### IV.DISCUSIÓN

Se evaluaron 120 escenarios en condiciones normales más 20 escenarios en condiciones especiales. Dando

como resultado los 140 escenarios en condiciones normales.

La combinación de frentes con mayor producción entre todos los escenarios óptimos fueron las que cuentan con el frente #5 Precón, todos estos escenarios sobrepasan el orden de las 7000 toneladas por día. Se mencionan los escenarios y sus tonelajes: escenario #42 F1-F5 7551 toneladas, escenario #74 F2-F5 7905 toneladas, escenario #98 F3-F5 7109 toneladas y el escenario #111 F4-F5 7332 toneladas.

Se analizaron las distancias desde los frentes de explotación hasta el lugar de descarga correspondiente y los resultados mostraron que viajar desde el frente #5 Precón hasta la trituradora de 350 t/h se recorre aproximadamente 897,9 metros, viajar desde los frentes #2 Lérica, #3 Fraga y #4 Explosa hasta la trituradora 650 t/h se recorre aproximadamente entre 1800 y 2000 metros; por último, viajar desde el frente #1 Derrumbe hasta la trituradora 650 t/h se recorre aproximadamente 1008,2 metros

Obteniendo un tonelaje promedio de todos los escenarios óptimos sin incluir los que tengan resultados con el F5 Precón (los de gran tonelaje por encima de los 7000), para los escenarios normales y especiales, se obtiene que el promedio en los escenarios óptimos normales es de 6004,8 toneladas; mientras que el promedio del tonelaje de los escenarios óptimos especiales se obtuvo un promedio muy cercano de 5984,86 toneladas.

### V.CONCLUSIÓN

Esta investigación busca identificar la óptima combinación de excavadora-camiones para los diferentes frentes de trabajos de la cantera Calizas Huayco mediante un modelo de simulación por eventos discretos desarrollado en el software Arena. Los resultados de la simulación muestran que, de los 140 escenarios evaluados, 14 de ellos son óptimos. Las combinaciones que obtuvieron mayor tonelaje producido fueron todos aquellos donde se extrajo material del frente # 5 Precón, mostrando un tonelaje promedio de 7000 t/d. Además, la simulación muestra que, en las condiciones especiales, el uso adicional de la excavadora Caterpillar de 2,6 m<sup>3</sup> junto a las excavadoras Komatsu de 2,8 m<sup>3</sup> no muestran una producción superior al tonelaje promedio que es de 6000 t/d. Por lo que descartó el uso de tres excavadoras en dos frentes.

Se puede continuar con el trabajo considerando el comportamiento del sistema en el periodo invernal, incluyendo los datos de fallas y mantenimiento de la maquinaria para tener una simulación que se asemeje más al sistema real.

## AGRADECIMIENTO

Se agradece a las empresas mineras Calizas Huayco SA y Logimin por la aprobación de esta investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bedon, M., & Omar, C. (2005). *CAPITULO II Lenguajes De Simulación Para Minería*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Castro, J. E. M. (2011). *De Simulación a Un Sistema De Carguío Y*.
- Cetin, N., Erarslan, K., & Okuducu, A. (2001). Computer simulation of track/shovel system at Tuncbilek coal mine using GPSS/H. *Proceedings of the Seventeenth International Mining Congress and Exhibition of Turkey*, 0–715.
- Dindarloo, S. R., Osanloo, M., & Frimpong, S. (2015). A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(3), 209–219. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n3a6>
- Land, M., & Software, R. (2004). Capítulo 5 . - Simulación en Software Rockwell Arena ., 31–45.
- Sturgul, J. (2017). *Discrete Simulation and Animation for Mining Engineers* (1st Editio). CRC Press.
- Tiile, R. N., Kaba, F. A., Aouad, N., & Arthur, F. (2016). Shovel-Truck Haulage Analysis Using Stochastic Discrete Event Simulation, 5(11), 495–500. <https://doi.org/10.21275/ART20162683>
- Upadhyay, S. P. (2016). *Shiv Prakash Upadhyay*. University of Alberta.