

**EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE RECURSOS EN CANTERAS CON
HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN, PARA LA EMPRESA CEMENTOS
AVELLANEDA S.A. SAN LUIS, ARGENTINA.**

HENRRY ALBEIRO CASTRO CASTRO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
INGENÍERIA DE MINAS
SOGAMOSO
2018**

**EVALUACIÓN DE CAPACIDAD DE RECURSOS EN CANTERAS CON
HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN, PARA LA EMPRESA CEMENTOS
AVELLANEDA S.A. SAN LUIS, ARGENTINA.**

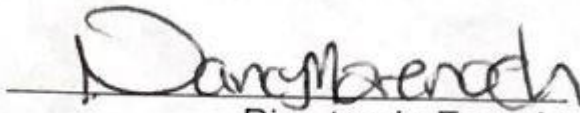
HENRRY ALBEIRO CASTRO CASTRO

**Trabajo de Grado Modalidad Monografía para optar al título de Ingeniero de
Minas**

**Director: Ing. Elkin David Palacios Rico
Codirectora: Dra. Graciela Verónica Gil-Costa**

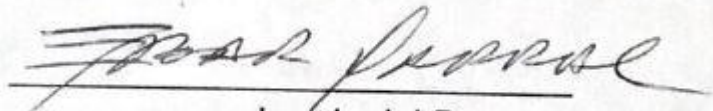
**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
INGENIERÍA DE MINAS
SOGAMOSO
2018**

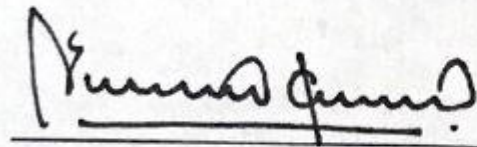
Nota de aceptación:


Director de Escuela


Director del Proyecto


Co-Directora del Proyecto


Jurado del Proyecto


Jurado del Proyecto

Sogamoso 10 de Abril de 2018

**“LA AUTORIDAD CIENTÍFICA DE LA UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y
TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO,
RESIDE EN ELLA MISMA, POR LO TANTO NO RESPONDE A LAS OPINIONES
EXPRESADAS EN ESTE PROYECTO”**

**SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN DEL MISMO INDICANDO SU ORIGEN Y
SU AUTOR.**

A mis padres y hermanos por su apoyo y colaboración incondicional.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

Empresa Cementos Avellaneda S.A.

Elkin David Palacios Rico, Ingeniero de Minas. Director del Proyecto.

Graciela Verónica Gil-Costa, Doctora en Ciencias de la Computación. Codirectora del Proyecto.

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Compañeros y profesores por su apoyo y colaboración.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. GENERALIDADES	17
1.1. LOCALIZACIÓN	17
1.2. GEOLOGÍA REGIONAL	18
1.2.1. Geología local del yacimiento Las Toscas (Cerro Redondo)	20
1.2.2. Geología local del yacimiento Cerro La Calera	20
1.2.3. Geología local del yacimiento Caliminas	21
1.3. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN	21
2. SIMULACIÓN	25
2.1. DEFINICIÓN Y CONCEPTOS GENERALES	25
2.1.1. Sistema	26
2.1.2. Modelo	27
2.2. ETAPAS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN	28
2.3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN	29
2.3.1. Generación de variables aleatorias no uniformes	30
2.3.2. Lenguajes de Programación	30
2.3.3. Condiciones iniciales	30
2.3.4. Tamaño de la muestra	31
2.3.5. Diseño de experimentos	31
2.4. PIEZAS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN	32
2.4.1. Entidades	32
2.4.2. Atributos	32
2.4.3. Variables	32

2.4.4. Recursos	33
2.4.5. Colas	33
2.4.6. Acumuladores estadísticos	33
2.4.7. Eventos	33
2.4.8. Reloj de simulación	34
3. ARENA SIMULATION SOFTWARE	34
3.1. BARRAS DE HERRRAMIENTAS	35
3.1.1. Módulos, entidades y recursos	36
3.2. PANEL DE PROCESO BÁSICOS	37
3.3. PANEL DE PROCESOS AVANZADOS.	39
3.4. PANEL DE TRANSFERENCIA AVANZADA	40
4. ANÁLISIS DEL SISTEMA	42
4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	42
4.2. TOMA DE DATOS	43
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	44
4.3.1. Cantera Calera	45
4.3.1.1. Transporte Calera-Trituradora	45
4.3.1.2. Carga	46
4.3.1.3. Descarga	47
4.3.1.4. Trituradora-Calera	48
4.3.2. Cantera Calimina	49
4.3.2.1. Calimina-Trituradora	49
4.3.2.2. Carga	50
4.3.2.3. Trituradora-Calimina	51
4.3.3. Cantera Redondo	52
4.3.3.1. Carga	52
4.3.3.2. Redondo-Trituradora	53
4.3.3.3. Trituradora-Redondo	54
5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA	55
5.1. MODELO USANDO UNA PALA CARGADORA EN CADA FRENTE DE EXPLOTACIÓN	55

5.1.1. Frentes de Explotación	56
5.1.2. Planta	57
5.2. MODELO USANDO UNA PALA CARGADORA PARA LOS TRES FRENTES DE EXPLOTACIÓN	58
5.2.1. Frentes de Explotación	58
5.2.2. Planta	60
6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	61
6.1. RESULTADOS PARA MODELO CON UNA PALA CARGADORA EN CADA FRETE DE EXPLOTACIÓN	61
6.2. RESULTADOS PARA MODELO CON UNA PALA CARGADORA PARA LOS TRES FRENTES DE EXPLOTACIÓN	66
6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
7. CONCLUSIONES	77
8. RECOMENDACIONES	79
BIBLIOGRAFIA	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Calidades de Caliza por Cantera.	22
Tabla 2. Porcentaje de extracción por cantera.	24
Tabla 3. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calera-Trituradora.	45
Tabla 4. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calera.	46
Tabla 5. Distribución Beta para tiempos de descarga.	47
Tabla 6. Distribución Weibull para tiempos de transporte Trituradora-Calera.	48
Tabla 7. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calimina-Trituradora.	49
Tabla 8. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calimina.	50
Tabla 9. Distribución Gamma para tiempos de transporte Trituradora-Calimina.	51
Tabla 10. Distribución Lognormal para tiempos de carga en redondo.	52
Tabla 11. Distribución Gamma para tiempos de transporte Redondo-Trituradora.	53
Tabla 12. Distribución Triangular para tiempos de transporte Trituradora-Redondo.	54
Tabla 13. Datos de tiempo y velocidad.	55
Tabla 14. Datos de tiempo y velocidad para modelo con una pala cargadora.	58
Tabla 15. Tiempos de espera en cola para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.	72
Tabla 16. Tiempos de espera en cola en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	72

LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Grafica 1. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calera-Trituradora.	45
Grafica 2. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calera.	46
Grafica 3. Distribución Beta para tiempos de descarga.	47
Grafica 4. Distribución Weibull para tiempos de transporte Trituradora-Calera.	48
Grafica 5. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calimina-Trituradora.	49
Grafica 6. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calimina.	50
Grafica 7. Distribución Gamma para tiempos de transporte Trituradora-Calimina.	51
Grafica 8. Distribución Lognormal para tiempos de carga en Redondo.	52
Grafica 9. Distribución Gamma para tiempos de transporte Redondo-Trituradora.	53
Grafica 10. Distribución Triangular para tiempos de transporte Trituradora-Redondo.	54
Grafica 11. Estadísticas de entidades en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.	63
Grafica 12. Otras estadísticas de uso de recursos para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.	65
Grafica 13. Estadísticas de uso específico para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.	66
Grafica 14. Estadísticas de entidades en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	67
Grafica 15. Otras estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	70
Grafica 16. Estadísticas de uso específico en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.	71
Grafica 17. Entidades de tipo de caliza producidas.	74

Grafica 18. Procesos y utilización de procesos.	75
Grafica 19. Contadores de Caliza de alta y baja calidad.	76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización Geográfica Cementos Avellaneda S.A. San Luis.	17
Figura 2. Mapa Geológico Regional de Serranías Occidentales San Luis, Argentina.	18
Figura 3. Mapa Geológico-Estructural de la Sierra El Gigante.	19
Figura 4. Ubicación de Canteras.	23
Figura 5. Cantera Cerro La Calera.	23
Figura 6. Cantera Cerro Redondo.	24
Figura 7. Cantera Cerro Caliminas.	24
Figura 8. Tipos de Sistema.	26
Figura 9. Tipos de Modelo.	27
Figura 10. Ventana principal de ARENA.	37
Figura 11. Panel de procesos básicos de Arena.	37
Figura 12. Panel de procesos avanzados de Arena.	39
Figura 13. Panel de transferencia avanzada de Arena.	41
Figura 14. Modelo a simular.	43
Figura 15. Frente Redondo para modelo con tres palas cargadoras.	56
Figura 16. Frente Calera para modelo con tres palas.	56
Figura 17. Frente Calimina para modelo con tres palas.	56
Figura 18. Planta para modelo usando una pala cargadora en cada frente de explotación.	57
Figura 19. Frente Redondo para modelo con una pala.	59
Figura 20. Frente Calera para modelo con una pala.	59
Figura 21. Frente Calimina para modelo con una pala.	59

Figura 22. Planta para modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	60
Figura 23. Especificaciones en la simulación.	61
Figura 24. Estadísticas de tiempo para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.	62
Figura 25. Estadísticas de colas en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.	64
Figura 26. Estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.	65
Figura 27. Estadísticas de tiempo en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	67
Figura 28. Estadísticas de colas en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	68
Figura 29. Estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.	69

RESUMEN

La empresa Cementos Avellaneda S.A. cuenta con tres canteras de las cuales se extrae caliza de diferente calidad que es dirigida a la trituradora primaria, teniendo en cuenta la calidad de la caliza se debe dirigir la maquinaria de cargue y la flota de transporte hacia las diferentes canteras, con el fin de cumplir con la exigencia de calidad de mezcla necesitada en planta, para esto se realizó un estudio estadístico de las operaciones de cargue, transporte y trituración del sistema, con el objetivo de determinar el tipo de distribución que presentaban los datos en cada frente y desarrollar el modelo para simular.

A partir de los resultados del estudio estadístico se desarrollaron dos modelos: el primero, en el cual se usa una pala cargadora en cada frente de explotación y el segundo, en el cual se usa una pala cargadora para los tres frentes de explotación, con la premisa de que siempre debe haber mineral disponible en los frentes. Los resultados de la simulación de los dos modelos concluyeron que el segundo optimiza el uso de los recursos disponibles para carga, transporte y trituración, obteniendo los mayores rendimientos en producción y disminuyendo los tiempos muertos de la maquinaria utilizada en cada operación.

INTRODUCCIÓN

El ciclo minero está conformado por una serie de etapas u operaciones unitarias que de ser llevadas a cabo eficientemente permitirán que la producción diaria, semanal, mensual y anual estimada para la mina sea la requerida. Al fallar o haber demoras en una de estas operaciones generara una reacción en cadena afectando las operaciones siguientes, lo cual se verá reflejado en una disminución de la producción requerida.

Dos de estas operaciones unitarias son el cargue y el transporte, cuyos objetivos son cargar y trasladar el material producto de la voladura desde el frente de explotación hasta su destino (stock pile, tolvas, alimento para trituradoras, planta, etc.), estas son de las más costosas dentro del ciclo minero, ya que deben ser continuas y debido a la magnitud de los equipos se tornan lentas, conformando un sistema complejo que incide directamente en la productividad y con gran influencia en la toma de decisiones, que buscan una mayor eficiencia dentro de la operación minera.

Junto con el transporte, el cargue, la producción y la trituración se conforma un sistema de gran complejidad que le da viabilidad a la operación minera.

Este sistema complejo de producción, cargue, transporte y trituración puede ser evaluado mediante herramientas de simulación, que son técnicas muy poderosas actualmente usadas, las cuales permitirán ejecutar el modelo del sistema a través del tiempo, para obtener resultados representativos sobre el cambio de su comportamiento.

Ayudando así con una de las tareas del Ingeniero de minas, que consiste en optimizar las etapas de cargue, transporte, capacidad de tolvas, stock y trituradoras, lo que permitirá cumplir con la producción estimada y esta optimización puede llevarse a cabo mediante el uso de herramientas de simulación.

1. GENERALIDADES

1.1. LOCALIZACIÓN

La planta San Luis propiedad de la empresa Cementos Avellaneda S.A. está ubicada en la localidad de La Calera, Departamento de Belgrano, provincia de San Luis, Republica de Argentina a unos 80 Km al noroeste de la Ciudad de San Luis.

Se accede a ella por la ruta Nacional N° 147 hasta la intersección con la ruta Provincial N° 35 que permite el acceso a la localidad de La Calera, a partir de este punto se avanzan 14 Km en dirección noroeste hasta la Fabrica. (Ver Figura 1).

Figura 1. Localización Geográfica Cementos Avellaneda S.A. San Luis.

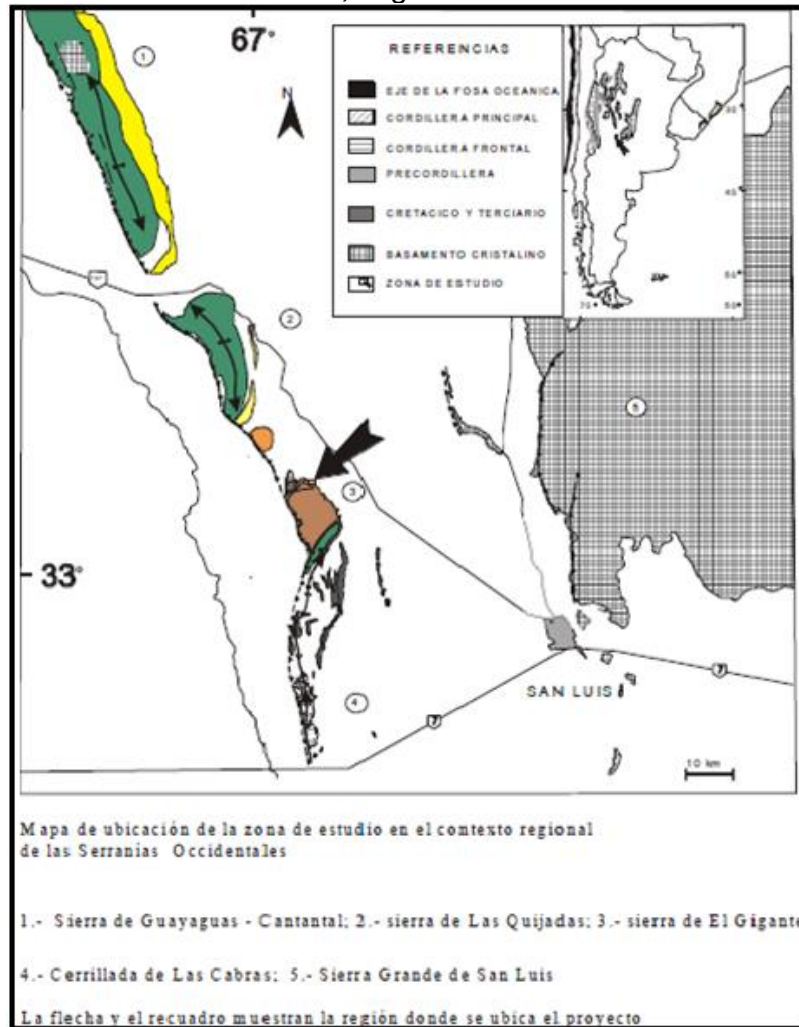


Fuente: Datos de Estudio.

1.2. GEOLOGÍA REGIONAL

La zona en la que se encuentran las canteras de Cementos Avellaneda S.A. forma parte del basamento de la sierra de El Gigante, el cual representa un bloque aislado rodeado por una continua planicie cuyo gradiente desciende hacia el nivel de base local establecido por el Río Desaguadero. (Ver Figura 2).

Figura 2. Mapa Geológico Regional de Serranías Occidentales San Luis, Argentina.



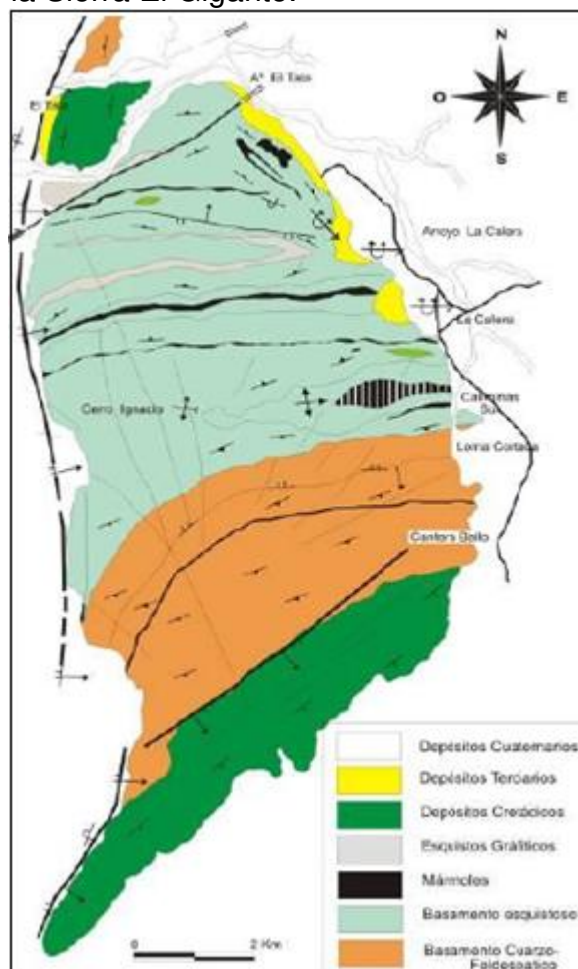
Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

La sierra de El Gigante constituye una sucesión de asomos esporádicos y de escasa relevancia morfológica que constituye una faja submeridiana denominada Serranías Occidentales y que está integrada por algunos núcleos de basamento como lo son el Cerro Guayaguas en el límite de la provincia con San Juan y la sierra del Gigante.

El resto de las expresiones están dadas por antiguas cuencas mesozoicas reactivadas durante la orogenia andina dando como producto la cerrillada de Las Cabras, Sierra de Las Quijadas y Guayaguas-Cantantal que poseen una interesante alternativa exploratoria para fines petroleros.

El área de explotación se halla representada básicamente por El Complejo Metamórfico El Gigante¹, quien está integrado por una sucesión alternante de esquistos y mármoles con intercalaciones menores de cuarcitas y anfibolitas, que dominan el sector norte y centro de la sierra (Ver Figura 3).

Figura 3. Mapa Geológico-Estructural de la Sierra El Gigante.



Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

¹Gardini, C., Dalla Salda, L.H., 1997. El complejo metamórfico de la sierra de El Gigante, San Luis, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 52: 132-142.

Dicho complejo ha sido sometido a importantes presiones y temperaturas que originaron las rocas metamórficas, consecuentemente se produjeron deformaciones en distintos estadios que originaron el plegamiento y replegamiento de toda la secuencia. Como consecuencia de ello se generaron una serie de diseños apretados a isoclinales caracterizando una importante disarmonía producto del contraste reológico existente entre los esquistos y los mármoles.

La gran ductilidad del mármol (calizas) hace que su diseño y geometría no sea fácil de entender atendiendo a que por la deformación y el metamorfismo se produce estiramientos de los flancos e importantes engrosamientos de las charnelas. El estilo general del plegamiento indica una predominancia de pliegues asimétricos isoclinales con convergencia promedio al sur y los ejes de los mismos inclinan hacia el este y oeste respectivamente.

Por la acción de esfuerzos repetidos y en diferentes direcciones, producto de la deformación regional, a consecuencia de esto se produjeron pliegues superpuestos, lo que produjo complicaciones mayores en el diseño general de las unidades. Dichas características se ponen en evidencia en los bancos de mármoles, quienes ofician perfectamente de bancos guías.

1.2.1. Geología local del yacimiento Las Toscas (Cerro Redondo). El yacimiento Las Toscas ocupa el sector NE de la sierra el Gigante donde las unidades litológicas están integradas por esquistos micáceos, esquistos carbonáticos, mármoles esquistosos y mármoles.

La inclinación media de la foliación es de 25° a 50° NE. En general, todos los pliegues poseen un importante estiramiento de sus flancos y una migración del material hacia la zona de charnelas, esto trae aparejado la consecuente complicación en este sector por la lógica falta de espacio.

1.2.2. Geología local del yacimiento Cerro La Calera. El cerro La Calera se encuentra ubicado en el área centro oriental de la sierra, sector donde las unidades litológicas en contacto, están integradas principalmente por esquistos micáceos y mármoles. Estructuralmente refleja una aparente uniformidad monoclinal con rumbos promedios este-oeste y buzamientos al norte, lo cual se puede apreciar en el análisis de las fotografías aéreas.

La inclinación media de la foliación es de 35 grados al norte hasta vertical. A pesar de esto el banco de mármol posee un importante plegamiento interno cerrado a muy apretado con pliegues asimétricos, inclinados a volcados, lo que conforma un panorama estructural complejo.

La roca utilizada para la producción es un mármol de aspecto general macizo, denominada en la jerga económica como “Caliza” o “Caliza Cristalina”, de color gris azulado a gris oscuro con veteados claros y oscuros. El mármol se caracteriza por su tenacidad, lo que normalmente genera un importante resalto morfológico respecto de los esquistos que lo circundan.

Este fenómeno morfológico, que se mantiene hacia el oeste, fuera del área del yacimiento resulta interesante ya que deja al descubierto una importante parte del banco que, como consecuencia, lo exime del destape para su explotación.

1.2.3. Geología local del yacimiento Caliminas. El área del cerro La Cruz, donde se halla ubicado el yacimiento Caliminas Norte se encuentra ubicado en el área central de la sierra, en su culminación oriental, sector donde las manifestaciones rocosas culminan y comienza el desarrollo del piedemonte y la planicie del arroyo La Calera. Geológicamente el sector está integrado principalmente por esquistos micáceos y bancos de mármoles intercalados con espesores del metro hasta 10 metros con variaciones a lo largo de su rumbo.

Estructuralmente refleja una aparente uniformidad monoclinas con rumbos promedios este-oeste y buzamientos al norte, lo cual se puede apreciar en el análisis de las fotografías aéreas. La inclinación media de la foliación es de 45 grados al norte hasta subverticales.

A pesar de esto el banco de mármol posee un importante plegamiento interno cerrado a muy apretado con pliegues asimétricos, inclinados a volcados, lo que conforma un panorama estructural complejo.

El mármol se caracteriza por su tenacidad, lo que normalmente genera un resalto morfológico respecto de los esquistos que lo circundan, aunque en este sector por ser los espesores más delgados la relevancia topográfica es menor que en otros ejemplos de la zona.

1.3. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN

En Cementos Avellaneda S.A. se realiza una explotación a cielo abierto donde la extracción se realiza en forma simultánea en varias canteras, cada cantera contiene caliza de diferente calidad como se muestra en la Tabla 1.

Estas canteras están ubicadas en un radio de 6 Km alrededor de la fábrica. (Ver Figura 4).

Tabla 1. Calidades de Caliza por Cantera.

Calidades de las Calizas por Cantera.	
Calidades de Caliza	KST
La Calera (Caliza Súper Alta)	150-1000
Redondo (Caliza Media Alta)	65-150
Caliminas (Caliza Media)	65-100

Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

KST² se define como Standard de cal y hace referencia a la cantidad de cal que teóricamente fijan los componentes ácidos, cuando el sistema (CLINKER) se enfría tan lentamente que se llega a alcanzar el equilibrio químico correspondiente a la temperatura ordinaria y se calcula con la siguiente expresión:

$$KST = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.1Al_2O_3 + 0.7Fe_2O_3}$$

Donde:

CaO: Oxido de Calcio.

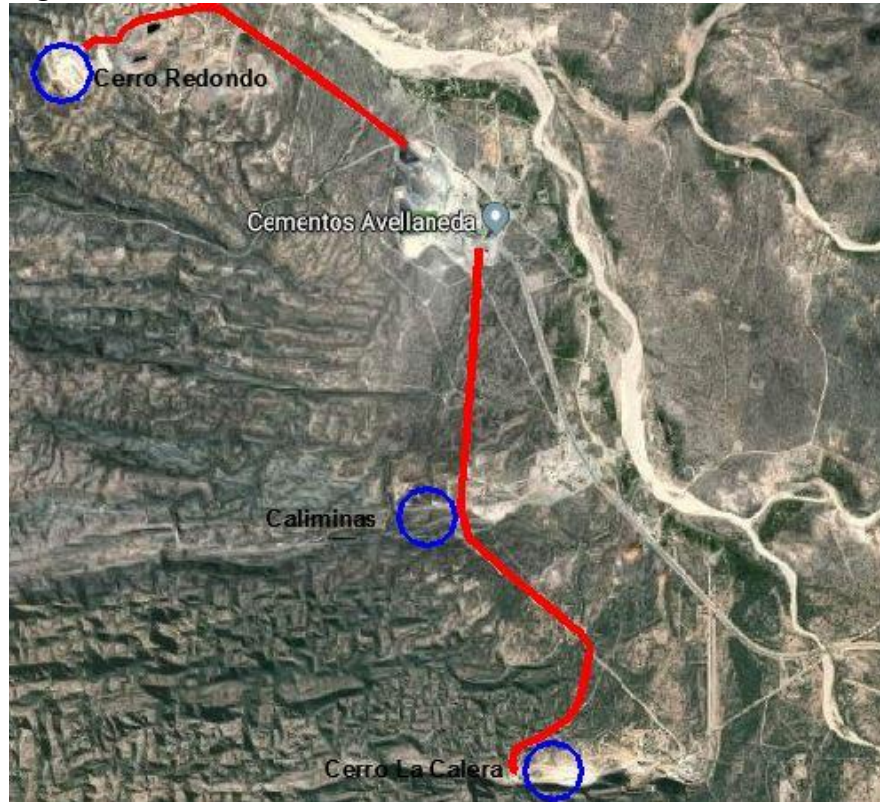
SiO₂: Dióxido de Silicio.

Al₂O₃: Oxido de Aluminio.

Fe₂O₃: Óxido de hierro (III)

² FERNÁNDEZ PARIS, José. Dosificación de crudos de cemento Portland mediante el módulo de cal. Madrid. 1967 p 29.

Figura 4. Ubicación de Canteras.



Fuente: Google Earth y Cementos Avellaneda S.A.

Figura 5. Cantera Cerro La Calera.



Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

Figura 6. Cantera Cerro Redondo.



Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

Figura 7. Cantera Cerro Caliminas.



Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

El porcentaje de extracción de cada cerro (Ver tabla 2) depende estrictamente de la calidad exigida en la pila de pre homogenización (Blending) la cual se dosifica a partir de las características químicas del polvo crudo.

Tabla 2. Porcentaje de extracción por cantera.

Porcentaje de Extracción por Cantera		
Redondo	L a Calera	Caliminas
46.5%	35.6%	17.8%

Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

2. SIMULACIÓN

En el mundo actual, tanto en el área de los negocios, como en la industria y el gobierno, los proyectos en gran escala y de gran complejidad son la regla y no la excepción. En estos proyectos, se deben tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que el mismo ejecutará. Para poder decidir correctamente es necesario saber cómo responderá el sistema ante una determinada acción. Esto podría hacerse por experimentación con el sistema mismo; pero factores de costos, seguridad y otros hacen de esta opción generalmente inviable, estos proyectos complejos requieren estudios previos a su construcción o modificación, denominados estudios pilotos.

Se reemplaza el sistema real por otro sistema que en la mayoría de los casos es una versión simplificada. Tales estudios pilotos se realizan utilizando la técnica llamada modelización, es decir, se refiere a la construcción de un modelo abstracto que representa un sistema de la vida real, construido el modelo, el proceso de experimentar/ensayar en él una alternativa se llama simulación. El conjunto de alternativas que se definen para su ensayo constituye la estrategia de la simulación y al proceso de diseñar el plan de experimentación para adoptar la mejor decisión se denomina optimización.

2.1. DEFINICIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

Thomas H. Naylor³ define la simulación como una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos a través de largos periodos de tiempo.

La definición anterior está en un sentido muy amplio, en sentido más estricto, H. Maisel y G. Gnugnoli⁴ definen simulación como: Una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo.

³ LIRA, Jorge A., LUJAN V, Gonzalo. Entorno abierto de desarrollo y ejecución de simulaciones discretas. Buenos Aires. p 8.

⁴ COSS B, Raúl. Simulación un enfoque práctico. México: Limusa Noriega Editores, 2003 p. 12.

2.1.1. Sistema. Un sistema es un conjunto de componentes o entidades organizadas y relacionadas que interactúan entre sí para lograr un objetivo. Cada entidad o componente tiene sus características propias, definidas por un conjunto de variables.

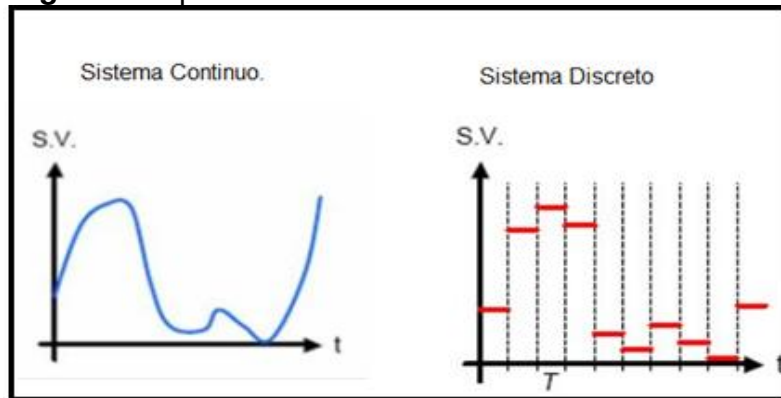
Los elementos que conforman el sistema vienen condicionados por el objetivo del estudio que se pretende realizar, ya que un sistema definido para un estudio determinado puede ser una parte de un sistema más amplio definido para otro estudio particular.

El estado del sistema⁵ en un instante de tiempo determinado se puede definir como la descripción de todos los elementos, atributos y actividades en dicho instante. Por ejemplo, el estado de una oficina bancaria en un instante se podría definir mediante el número de cajeros en él, el número de clientes, el instante de llegada de cada cliente y el tipo de operación que desea realizar cada uno. Este conjunto constituiría las variables de estado del sistema.

Hay que diferenciar dos tipos de sistemas: discretos y continuos (Ver Figura 8) según sea el valor de dichas variables:

- En los sistemas discretos el valor de las variables cambia en instantes determinados y separados en el tiempo,
- En los continuos, el valor de las variables que definen el estado del sistema cambia continuamente con respecto al tiempo.

Figura 8. Tipos de Sistema.



Fuente: Simulación de Procesos Mineros, UNSL.

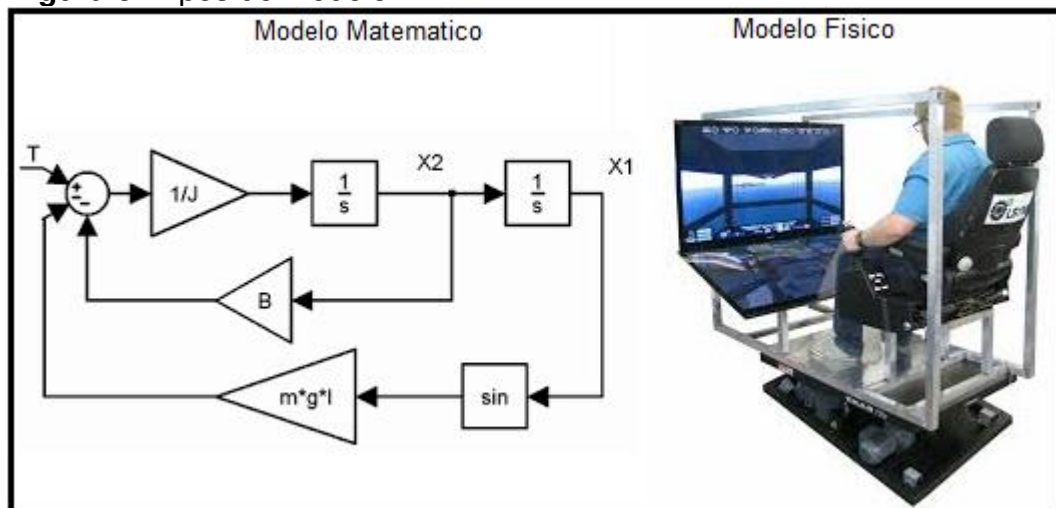
⁵ GARCIA S, Álvaro. ORTEGA M, Miguel. Introducción a la simulación de sistemas discretos. Madrid, 2006 p 2.

2.1.2. Modelo. Un modelo es una representación simplificada de un sistema, elaborado para comprender, predecir y controlar el comportamiento de dicho sistema.

Se debe diferenciar entre dos tipos de modelos: modelos físicos y modelos matemáticos: (Ver Figura 9)

- Los modelos físicos están formados por una estructura material que tiene unas características, en cuanto al objeto del estudio, similares a las del sistema real. Ejemplos de modelos físicos pueden ser las maquetas a escala y también los modelos analógicos que, sin tener la misma estructura física que el sistema real, tienen un comportamiento similar con respecto a algunas variables de estado.
- Un modelo matemático representa el sistema por medio de relaciones lógicas y cuantitativas entre sus variables de estado. Tanto el valor de las variables como sus relaciones se pueden modificar para estudiar cómo reacciona el modelo y, por lo tanto, cómo reaccionaría el sistema real ante dichos cambios. Aunque en casos puntuales se han desarrollado modelos físicos, para el estudio de los sistemas productivos en la gran mayoría de las ocasiones se utilizan modelos matemáticos.

Figura 9. Tipos de Modelo.



Fuente: Simulación de Procesos Mineros, UNSL.

2.2. ETAPAS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN⁶

La mayoría de autores sobre simulación opinan que los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación son:

- Definición del sistema. Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.
- Formulación del modelo. Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados esperados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa el modelo.
- Colección de datos. Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo se puede obtener de registros contables, de órdenes de trabajo, de órdenes de compra, de opiniones de expertos y si no hay otro remedio por experimentación.
- Implementación del modelo en la computadora. Con el modelo definido, el siguiente paso es decidir si se utiliza algún lenguaje como fortran, basic, algol, etc., o se utiliza algún paquete como GPSS, simula, simscript, etc., para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.
- Validación. Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar un modelo son:

⁶ GARCIA S, Álvaro. ORTEGA M, Miguel. IZQUIERDO D, David. Elementos de simulación, un enfoque práctico con Witness. Madrid, 2012 p 17.

- La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación.
 - La exactitud con la que se predicen datos históricos.
 - La exactitud en la predicción del futuro.
 - La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
 - La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroje el experimento de simulación.
- Experimentación. La experimentación con el modelo se realiza después de que este ha sido validado. La experimentación consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
 - Interpretación. En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a esto se toma una decisión.

Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semi-estructurado, es decir, la computadora en si no toma la decisión, sino que la información que proporciona ayuda a tomar mejores decisiones y por consiguiente a sistemáticamente obtener mejores resultados.

- Documentación. Dos tipos de documentación son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación. La primera se refiere a la documentación de tipo técnico, es decir, a la documentación que el departamento de Procesamiento de Datos debe tener del modelo.

La segunda se refiere al manual del usuario, con el cual se facilita la interacción y el uso del modelo desarrollado, a través de un terminal de computadora.

2.3. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

Puesto que la simulación está basada fuertemente en la teoría de probabilidad y estadística, en matemáticas, en ciencias computacionales, etc., es conveniente decir algunas ideas de como intervienen estas áreas en el desarrollo y formulación del modelo de simulación.

2.3.1. Generación de variables aleatorias no uniformes. Si el modelo de simulación es estocástico, la simulación debe ser capaz de generar variables aleatorias no-uniformes de distribuciones de probabilidad teóricas empíricas. Lo anterior puede ser obtenido si se cuenta con un generador de números uniformes y una función que transforme estos números en valores de la distribución de probabilidad deseada. A este respecto, se han desarrollado una gran cantidad de generadores para las distribuciones de probabilidad más comunes como: la distribución normal, la distribución exponencial, la distribución poisson, la distribución erlang, la distribución binomial, la distribución gamma, la distribución beta, la distribución F, la distribución t, etc.

2.3.2. Lenguajes de Programación. Las primeras etapas de un estudio de simulación se refieren a la definición del sistema a ser modelado y a la descripción del sistema en términos de relaciones lógicas de sus variables y diagramas de flujo. Sin embargo, llega el momento de describir el modelo en un lenguaje que sea aceptado por la computadora que se va a usar. En esta etapa se tienen dos cursos de acción a seguir si no se tiene nada de software sobre simulación: 1) Desarrollar el software requerido para estudios de simulación, o 2) Comprar software (lenguajes de programación de propósito especial). Para esta alternativa es necesario analizar y evaluar varios paquetes de simulación (GPSS, GASP, etc.) antes de tomar la decisión final.

2.3.3. Condiciones iniciales. La mayoría de los modelos de simulación estocástica se corren con la idea de estudiar al sistema en una situación de estado estable. Sin embargo, la mayoría de estos modelos presentan en su etapa inicial estados transientes los cuales no son típicos del estado estable. Por consiguiente es necesario establecer claramente las alternativas o cursos de acción que existen para resolver este problema. Algunos autores piensan que la forma de atacar este problema sería a través de:

- Usar un tiempo de corrida lo suficientemente grande de modo que los periodos transientes sean relativamente insignificantes con respecto a la condición de estado estable.
- Excluir una parte apropiada de la parte inicial de la corrida.
- Utilizar simulación regenerativa.

Obviamente, de las tres alternativas presentadas, la que presenta menos desventajas es el uso de simulación regenerativa. Las otras alternativas presentan las desventajas de ser prohibitivamente excesivas en costo.

2.3.4. Tamaño de la muestra. Uno de los factores principales a considerar en un estudio de simulación es el tamaño de la muestra (número de corridas en la computadora).

La selección de un tamaño de muestra apropiado que se asegure un nivel deseado de precisión y a la vez minimice el costo de operación del modelo, es un problema algo difícil pero muy importante. Puesto que la información proporcionada por el experimento de simulación sería la base para decidir con respecto a la operación del sistema real, esta información deberá ser tan exacta y precisa como sea posible o al menos el grado de imprecisión presente en la información proporcionada por el modelo debe ser conocida. Por consiguiente, es necesario que un análisis estadístico sea realizado para determinar el tamaño de muestra requerido.

2.3.5. Diseño de experimentos. El diseño de experimentos es un tópico cuya relevancia en experimentos de simulación ha sido reconocida pero raramente aplicado. El diseño de experimentos en estudios de simulación puede ser de varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que se hayan planteado. Existen varios tipos de análisis que pueden ser requeridos. Entre los más comunes e importantes se pueden mencionar los siguientes:

- Comparación de las medias y varianzas de las alternativas analizadas.
- Determinación de la importancia y el efecto de diferentes variables en los resultados de la simulación.
- Búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.

Para realizar el primer tipo de análisis, es necesario tomar muy en cuenta el tamaño de la muestra, las condiciones iniciales y la presencia o ausencia de auto correlación. Para el segundo tipo de análisis, existe una gran cantidad de literatura, puesto que la gran mayoría de los libros de texto de diseño de experimentos, explican o tratan el tema de análisis de varianza y técnicas de regresión como medios para evaluar la importancia y el efecto de varias variables en los resultados de operación de un sistema. Para el tercer tipo de análisis, generalmente se requiere utilizar algoritmos heurísticos de búsqueda como por ejemplo el algoritmo de Hooke y Jeeves.

2.4. PIEZAS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

Las partes o piezas de un modelo de simulación son:

2.4.1. Entidades. La mayoría de las simulaciones incluyen “jugadores” llamados entidades que se mueven alrededor, cambian de status, afectan y son afectados por otras entidades y el estado del sistema, y afectan las medidas de desempeño de los resultados. Las entidades son objetos dinámicos en la simulación, por lo general son creados, se mueven alrededor durante un tiempo y después son desechados conforme se van. Sin embargo, es posible tener entidades que nunca se van sino que se mantienen circulando en el sistema. No, obstante, todas las entidades deben ser creadas, ya sea por el programador o de forma automática por el software.

La mayoría de las entidades representan cosas “reales” en una simulación. Se pueden tener muchos tipos de entidades y muchas realizaciones de cada tipo de entidad existente en el modelo en un tiempo dado.

2.4.2. Atributos. Para individualizar las entidades, hay que añadirles atributos. Un atributo es una característica común de todas las entidades, pero con valor específico que puede diferir entre las entidades. Lo más importante sobre los atributos es que sus valores están unidos a entidades específicas. Una analogía a la programación por computadora tradicional es que los atributos son variables locales a cada entidad individual. Arena mantiene la pista de algunos atributos de forma automática, pero se puede necesitar definir, asignar valores, cambiar y usar atributos suyos.

2.4.3. Variables. Una variable (o variable global) es información que refleja alguna característica de su sistema, sin importar cuantos o que tipos de entidades haya alrededor. Existen dos tipos de variables: las variables incorporadas en Arena (numero en cola, numero de servidores ocupados, tiempo en el reloj de la simulación, etc.) y las definidas por el usuario (tiempo de servicio medio, tiempo de traslado, turno actual, etc.). Al contrario que los Atributos, las variables no están unidas a ninguna entidad específica, sino más bien pertenecen al sistema en su conjunto. Tienen acceso para todas las entidades y muchas se pueden cambiar por cualquier entidad.

Las variables para muchos propósitos. Por ejemplo, el tiempo para moverse entre dos estaciones de un modelo podría ser el mismo en todo el modelo, y una variable llamada tiempo de transferencia podría definirse y fijarse a un valor apropiado y después usarse en donde sea que se necesite; en un modelo modificado en donde

este tiempo se fija a una constante diferente, solo se necesita cambiar la definición de tiempo de transferencia para cambiar su valor en todo el modelo.

2.4.4. Recursos. Con frecuencia las entidades compiten entre ellas por el servicio de los recursos que representan cosas, como personal, equipo o espacio en el área de almacenaje de tamaño limitado. Una entidad se aprovecha de un recurso cuando está disponible y lo(s) libera cuando termina. Es mejor pensar en el recurso como una donación a la entidad más que pensar que a la entidad se le asigna el recurso, puesto que una entidad (como una parte) podría necesitar un servicio simultáneo de múltiples recursos (como una máquina o una persona).

Un recurso puede representar un grupo de varios servidores individuales, cada uno de los cuales se denomina una unidad de ese recurso.

2.4.5. Colas. Cuando una entidad no puede seguir adelante, quizá porque necesita aprovechar una unidad de un recurso que está inmovilizada por otra entidad, se requiere un lugar para esperar, que es la cola. En arena, las colas tienen nombre y pueden tener también capacidades de representación; por ejemplo: el espacio de suelo limitado por un amortiguador. El programador decide cómo manejar una entidad que llega a una cola que ya está llena.

2.4.6. Acumuladores estadísticos. Para obtener las mediciones de desempeño de resultados, debe mantener la pista de algunas variables intermedias de acumuladores estadísticos conforme progresa la simulación. Todos los acumuladores deben inicializarse en 0. Cuando algo sucede en la simulación, los acumuladores afectados se deben actualizar de la forma apropiada.

2.4.7. Eventos

Básicamente todo está centrado alrededor de los eventos. Un evento es algo que sucede en un instante de tiempo que puede cambiar atributos, variables o acumuladores estadísticos.

Para ejecutarse, una simulación debe mantener el rastro de los eventos que se supone sucedan en el futuro (simulado). En Arena, esta información se almacena en un calendario de eventos. Arena coloca cada evento programado en el calendario. En un modelo de evento discreto las variables que describen el sistema no cambian entre los eventos sucesivos. La mayor parte del trabajo en la simulación dirigida por eventos incluye obtener el derecho lógico de lo que sucede con cada tipo de evento.

2.4.8. Reloj de simulación. El valor actual del tiempo en la simulación se mantiene en una variable llamada reloj de simulación. A diferencia del tiempo real, el reloj de simulación no se encarga de todos los valores ni fluye de manera continua; más bien va del tiempo de un evento al tiempo del siguiente evento programado. Puesto que nada cambia entre los eventos, no hay necesidad de desperdiciar tiempo (real) analizando el tiempo (simulado) que no importa.

El reloj de simulación interactúa de forma cercana con el calendario de eventos. Al inicio de la simulación, y después de ejecutar cada evento, el registro de la parte alta del calendario de eventos (siempre el único para el siguiente evento) se retira del calendario. El reloj de simulación oscila hacia adelante al tiempo de ese evento (uno de los campos de datos en el registro de eventos) y la información del registro de eventos retirado (identificación de entidad, tiempo del evento y tipo de evento) se usa para ejecutar el evento en ese instante de tiempo simulado.

3. ARENA SIMULATION SOFTWARE

ARENA tiene sus orígenes en 1982; en ese año Dennis Pegden publicó el primer lenguaje de simulación de propósito general para modelar sistemas de manufactura en un PC. Esta aplicación constaba de varias características de manufactura de carácter especial, que hacían que el lenguaje fuera bastante útil y eficiente en el momento de modelar sistemas grandes y complejos.

Pero fue en 1993 cuando se introdujo el sistema de modelamiento ARENA, el cual crea ambientes gráficos e interactivos para el diseño de modelos mediante el uso del lenguaje SIMAN. Con base en este lenguaje se pueden crear modelos que simulen áreas específicas de los procesos, como el transporte de elementos y la comunicación, entre muchos otros.

ARENA es un sistema que provee un entorno de trabajo integrado para construir modelos de simulación en una amplia variedad de campos; integra, en un ambiente fácilmente comprensible, todas las funciones necesarias para el desarrollo de una simulación exitosa (animaciones, análisis de entrada y salida de datos y verificación del modelo).

El desarrollo de los modelos de simulación mediante este sistema tiene varias ventajas, entre las que se encuentran:

- Es una poderosa herramienta de simulación.
- Comprende un entorno amigable, que está especialmente diseñado para personas que no poseen conocimientos de programación.
- Los utilitarios que brinda son de fácil uso.
- Cuenta con una excelente capacidad gráfica.
- Ofrece gran versatilidad, pues se puede modelar desde una fábrica automotriz hasta una sala de espera de un hospital.
- Es compatible con productos MICROSOFT OFFICE.

Sin embargo, ARENA tiene también algunos puntos débiles a saber:

- Es difícil correr un modelo creado en ARENA en cualquier otro programa de simulación. Esto se da básicamente porque es difícil sincronizar los relojes con los que funcionan los programas.
- La edición para estudiantes tiene muchas limitaciones.
- La documentación y la ayuda que este sistema ofrece es poca; además, no es lo suficientemente clara, y algunos de los ejemplos que presenta tiene errores.

3.1. BARRAS DE HERRRAMIENTAS

El software Arena posee varias barras de herramientas con grupos de botones y menús desplegables para poder facilitar el acceso directo a las funciones con mayor uso.

Las barras de herramientas disponibles en Arena son: La barra de herramientas Standar, la barra de herramientas View, la barra Run Interaction y la barra Arrange cada barra se corresponde con la barra del menú del mismo nombre.

La barra Draw no tiene correspondencia con opciones de menú, por tanto, los dibujos únicamente se pueden realizar accediendo a la barra de herramientas. Así es como se pueden dibujar líneas, poli-líneas, arcos, etc., para mejorar el modelo. En la figura 10 se puede observar la ventana principal del software Arena.

3.1.1. Módulos, entidades y recursos. Los módulos son los elementos básicos con los que se construyen los modelos, estos se seleccionan de algunos de los paneles existentes en la barra de proyectos.

El diagrama que se construirá con estos módulos describe la dinámica asociada a los procesos que tienen lugar en el sistema, por lo que es conveniente conceptualizar los módulos como nodos de una red por donde circulan las entidades (clientes, productos, etc.), que fluyen por esta red desde un punto inicial hasta un punto por donde salen.

Las entidades pueden ser personas u objetos, reales o imaginarios, sus movimientos a través del sistema causan un cambio en el estado del sistema. Las entidades (documentos, clientes, piezas, etc.) son aquellas que están siendo producidas o atendidas o que de cualquier otra manera influyen en nuestro proceso. Las entidades son objetos dinámicos en la simulación, usualmente son creadas, circulan por un tiempo y después se van, aunque es posible también tener entidades que nunca se van y que se mantienen circulando en el sistema. Todas las entidades tienen que ser creadas ya sea por el modelador o automáticamente por Arena.

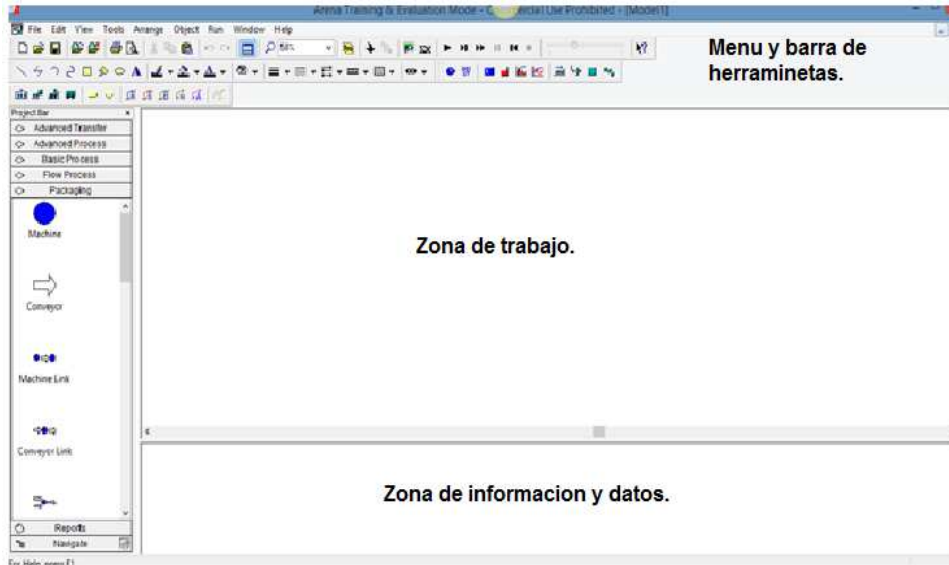
Las entidades contienen propiedades llamadas atributos que permiten crear diferencias entre ellas. Los atributos pueden ser el tiempo de llegada, la prioridad, fecha de vencimiento, color, etc.

Las entidades a menudo compiten entre ellas por los servicios que les brindan los recursos. Los recursos pueden ser cosas como personal, equipo o espacio en un área de almacenamiento.

Una entidad puede ocupar (seize) un recurso en la medida que este último se encuentre disponible y lo libera (reléase) cuando ya no lo necesita.

Siempre que una entidad ocupa (seize) un recurso lo debe liberar (reléase) en algún momento en el modelo. Mientras el recurso no sea liberado cualquier otra entidad que quiera utilizarlo tendrá que esperar en fila (queue).

Figura 10. Ventana principal de ARENA.

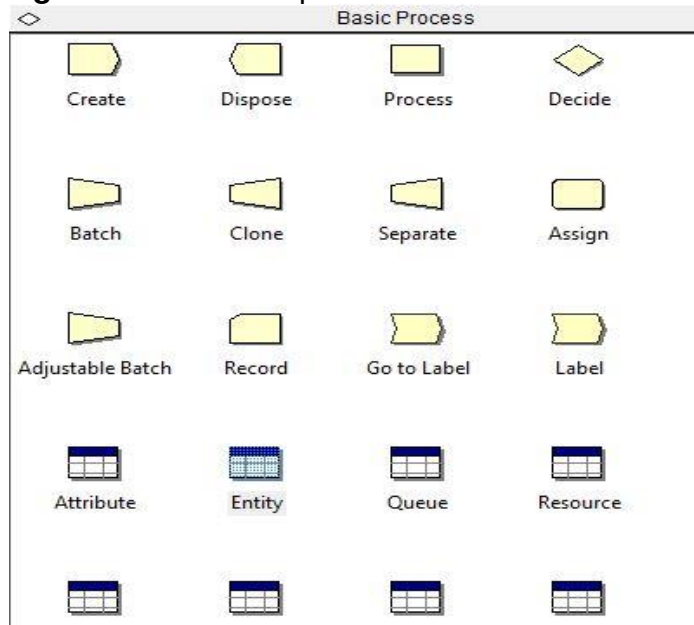


Fuente: Datos de Estudio.

3.2. PANEL DE PROCESO BÁSICOS

El panel de procesos básicos es un conjunto de módulos que permite la elaboración de diagramas de flujo de poca complejidad (Ver figura 11).

Figura 11. Panel de procesos básicos de Arena.



Fuente: Datos de estudio.

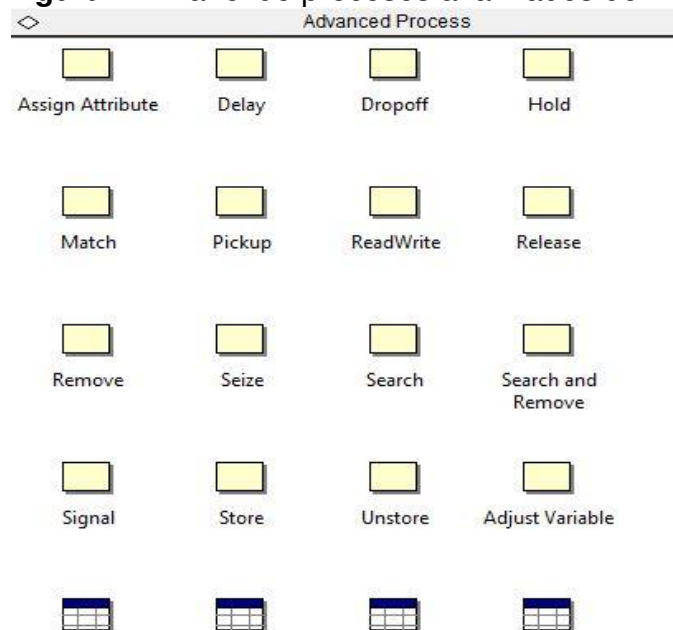
- Create. Las entidades que pasaran a ser procesadas en el sistema simulado se generan en este módulo, el cual se toma como punto de partida para la construcción de un modelo. En este módulo se asigna el atributo Entity Type.
- Dispose. Este módulo, tiene como función retirar una entidad del modelo, se agrega al final de todas las instrucciones en el momento en que se considere que la entidad ha llegado al punto de salida del sistema simulado.
- Process. En este módulo las entidades experimentan una operación que involucra la utilización de un recurso, la demora que ocasiona el tiempo de procesamiento y la liberación del recurso.
- Decide. Permite direccionar el flujo de entidades de acuerdo con una regla de decisión, la cual se puede basar en una condición, en una probabilidad o en una expresión.
- Batch. Permite formar lotes o grupos de entidades de un tamaño cualquiera y previamente definido.
- Separate. Separa lotes que se forman temporalmente; desarrolla la función opuesta al módulo batch.
- Assign. Su función es cambiar el valor de un atributo, figura, nivel, secuencia u otra variable del sistema.
- Record. Se emplea para recolectar estadísticas en el modelo de simulación. También se puede emplear como contador.
- Entity. En esta hoja de trabajo se definen las diferentes categorías, el atributo entity type, la primera animación que se le asigna a la entidad y sus respectivos costos iniciales.
- Queue. En este módulo se definen los nombres de las diferentes colas y tipo de regla de liberación que está asignada.
- Resource. Los recursos utilizados se declaran en este módulo; así mismo, se definen sus características como: capacidad, costo de operación y fallas.
- Variables. En esta hoja se definen los valores iniciales de las variables empleadas en el modelo y, en el caso de los arreglos, sus dimensiones.

- Schedule. En este módulo se define el horario de trabajo mediante el cual se programa la capacidad de un recurso.
- Sets. Se usa cuando se requieren formar grupos repetitivos de recursos, figuras, colas, contadores, estadísticas, etc., con el fin de facilitar el modelamiento de un sistema determinado.

3.3. PANEL DE PROCESOS AVANZADOS.

El panel de procesos avanzados es un conjunto de módulos de funciones especializadas que dan mayor grado de detalle y control al flujo de entidades en un modelo (Ver figura 12).

Figura 12. Panel de procesos avanzados de Arena.



Fuente: Datos de Estudio.

- Delay. Este módulo se encarga de retrasar a las entidades que lleguen a él por el tiempo especificado. Retiene las entidades conforme llegan al módulo, es capaz de retener varias entidades a la vez. Se puede usar para simular un desplazamiento.
- Release. Se encarga de liberar un recurso.
- Pickup. En este módulo una entidad portadora recoge otras entidades de una cola específica. El número de entidades retiradas que previamente se había

estipulado formará un grupo. Estas entidades se descargarán en un módulo *Dropoff*.

- **Dropoff.** Se encarga de retirar una cantidad específica de entidades de un grupo previamente formado por un módulo *Pickup* a partir de una posición determinada.
- **Hold.** Cumple tres funciones que afectan el flujo de entidades en el modelo. La primera es retener entidades hasta que una señal de la orden de liberarlas, la segunda es retener entidades y, con base en la evaluación de una condición del sistema liberarlas, la tercera consiste en retener entidades indefinidamente.
- **Match.** Sincroniza dos o más entidades; es decir, retiene varios tipos de entidades en filas independientes y libera al mismo tiempo y si las hay, una de cada tipo.
- **Release.** Se encarga de liberar un recurso.
- **Remove.** Su objetivo es retirar una entidad que ocupa una posición específica dentro de una cola determinada.
- **Seize.** Mediante este módulo una entidad toma control u ocupa un recurso determinado. Esta función solo se encarga de reservar el recurso para la entidad que lo está solicitando.
- **Search.** Se encarga de buscar una condición específica en un lote, fila o grupo de entidades.

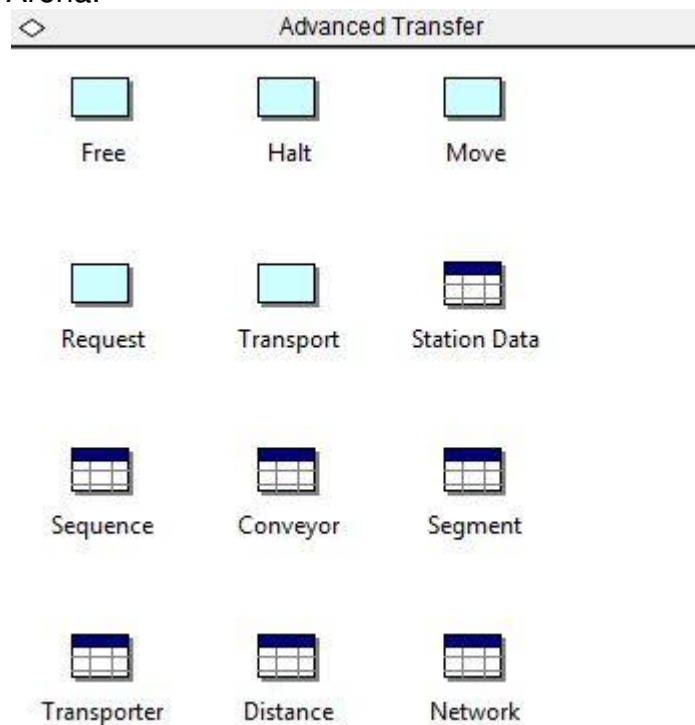
3.4. PANEL DE TRANSFERENCIA AVANZADA

En el modelamiento de sistemas productivos es frecuente encontrar que las transferencias de material se realizan a través de un elemento transportador, este panel es un conjunto de módulos que permiten simular la transferencia de material dentro de un sistema.

- **Route.** Este bloque traslada entidades hasta una estación determinada, simulando un tiempo de desplazamiento. Este tiempo se introduce de la misma forma que en bloques anteriores.

- Station. Es un bloque usado para diferenciar las partes del sistema. Su uso hace más manejable el modelo y facilita la definición de los movimientos entre las distintas partes del sistema. Son los lugares donde ocurren los procesos.
- Request. Este módulo se encarga de asignar el transporte a la entidad solicitante y mover el elemento transportador a la estación en donde esta se encuentra.
- Transport. Este módulo mueve el transporte desde la estación de origen hacia la estación de destino.
- Free. Este módulo libera el transporte.
- Move. Este módulo mueve el transporte al punto de partida.

Figura 13. Panel de transferencia avanzada de Arena.



Fuente: Datos de Estudio.

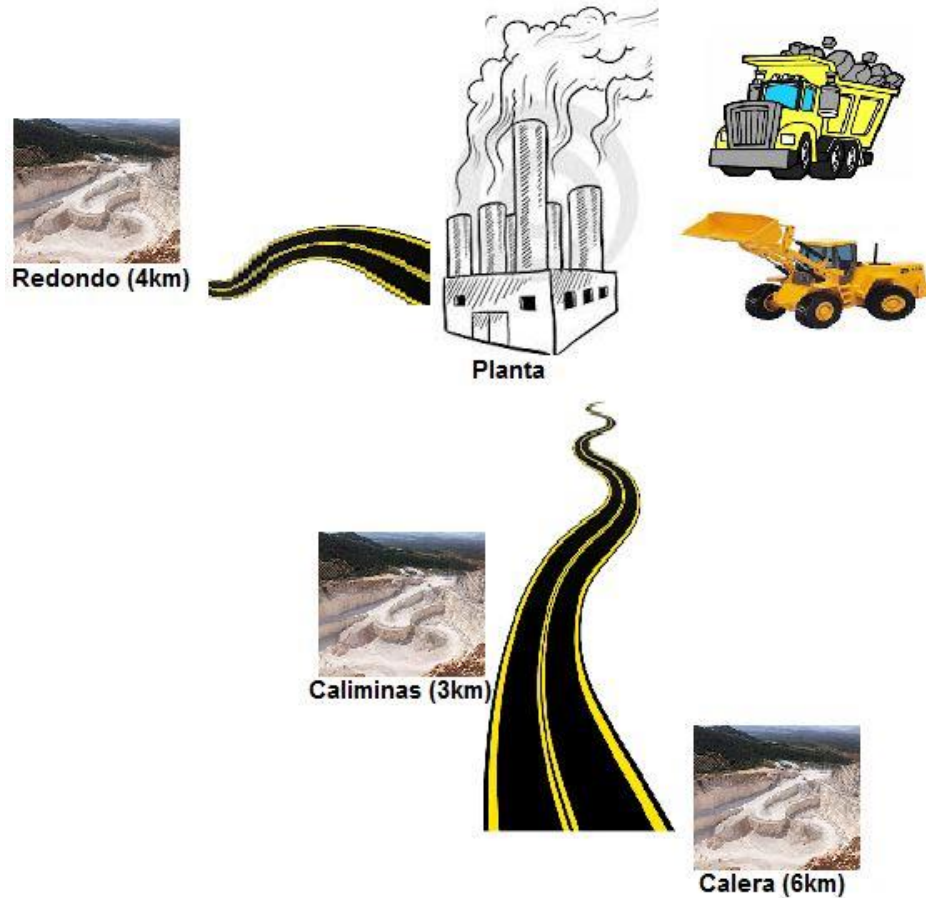
4. ANÁLISIS DEL SISTEMA

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El sistema que se va a simular está compuesto por: (Ver Figura 14)

- Frente de explotación Redondo: Este frente produce caliza de calidad baja y está localizado a cuatro (4) kilómetros de la playa donde se encuentra la trituradora primaria.
- Frente de explotación La Calera: Este frente produce caliza de calidad alta y está localizado a seis (6) kilómetros de la playa donde se encuentra la trituradora primaria.
- Frente de explotación Caliminas: Este frente produce caliza de calidad baja y está localizado a tres (3) kilómetros de la playa, donde se encuentra la trituradora primaria.
- Playa: Es la zona donde se encuentra la trituradora Primaria.
- Camiones: La flota de transporte consta de 5 camiones cada uno con capacidad de 20 m³ (25 toneladas aproximadamente). (Ver Anexo A).
- Cargadores: la empresa cuenta con tres (3) palas cargadoras. (3 paladas para llenar cada camión). (Ver Anexo B).
- Trituradora: La empresa cuenta con una trituradora primaria. (Ver Anexo C).
- Producción: La producción deseada es de 2000-2400 toneladas día.
- Calidad requerida en trituradora: 65% de caliza de calidad baja y 35% de caliza de calidad alta.
- Stock: Se desea conocer si es necesaria la implementación de stock en frentes de explotación y playa.

Figura 14. Modelo a simular.



Fuente: Datos de estudio

4.2. TOMA DE DATOS

Los datos corresponden a tiempos de carga, transporte y descarga de los camiones en los diferentes frentes de explotación: Calera, Calimina y Redondo. (Ver Anexos D, E, F, G, H).

El parámetro Carga corresponde al total de la sumatoria de tres subparámetros tenidos en cuenta: Posicionamiento del camión, Carga del Camión y Espera a la Pala.

El parámetro Transporte está diferenciado en dos, en el tiempo transcurrido del camión cargado desde el frente de explotación hasta la trituradora y el tiempo transcurrido del camión vacío desde la trituradora hasta el frente de explotación.

El parámetro descarga corresponde al total de la sumatoria de tres subparámetros tenidos en cuenta: espera, posicionamiento y descarga.

Para el segundo modelo fueron tenidos en cuenta los tiempos de desplazamiento entre frentes de explotación de la pala cargadora.

Para el frente Redondo fueron tomados 30 datos para cada parámetro, Para el frente Calera fueron tomados 35 datos para cada parámetro y para el frente Calimina fueron tomados 24 datos para cada parámetro.

4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Una modelización correcta de la aleatoriedad (*) requiere la recogida de observaciones que sirvan de base a un estudio estadístico que permita determinar el tipo de distribución de probabilidad (**) que mejor explica tal comportamiento. Para esto se utiliza la técnica de la inferencia estadística que permite ajustar los datos a la forma de una distribución teórica que mejor explique el comportamiento, y realizar pruebas de hipótesis para determinar la bondad del ajuste. La función de distribución particular que más se ajuste a los diferentes datos tomados en campo, será utilizada en el software ARENA para definir los parámetros de carga, transporte y descarga, desde cada frente de explotación hasta la trituradora y el regreso nuevamente a los frentes, dichas distribuciones garantizan la aleatoriedad del sistema.

Para determinar la bondad del ajuste se utilizan dos pruebas o test, el primero, el test Chi Cuadrado, este es una prueba de hipótesis que compara la distribución obtenida con la distribución chi cuadrado, esta prueba contrasta frecuencias observadas con las frecuencias esperadas de acuerdo con la hipótesis nula(***). El segundo es el test de Kolmogorov-Smirnov, este es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí, esta prueba contrasta las frecuencias relativas acumuladas de las dos distribuciones; teórica y observada.

* Se asocia a todo proceso cuyo resultado no es previsible más que en la intervención del azar. El resultado de todo suceso aleatorio no puede determinarse en ningún caso antes de que se produzca. Por consiguiente, los procesos aleatorios quedan englobados dentro del área del cálculo de probabilidad y, en un marco más amplio en el de la estadística.

** La distribución de probabilidad de una variable aleatoria es una función que asigna a cada suceso definido sobre la variable, la probabilidad de que dicho suceso ocurra.

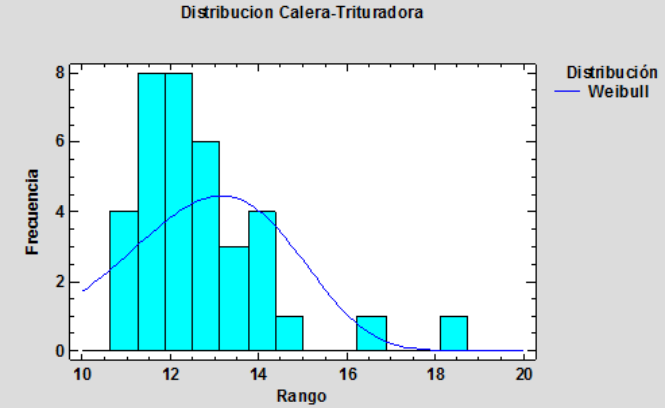
*** La hipótesis nula indica que un parámetro de la población (media, desviación estándar, etc.) es igual a un valor hipotético.

El software que se utilizara para el análisis estadístico y la determinación de la distribución de probabilidad más ajustada al comportamiento de los datos es ARENA, y para la determinación del histograma correspondiente a la distribución de los datos el software Statgraphics Centurion.

4.3.1. Cantera Calera

4.3.1.1. Transporte Calera-Trituradora. Para los tiempos de transporte desde la cantera Calera hasta la trituradora se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 3. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calera-Trituradora.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribucion: Weibull Expresión: $11 + WEIB(1.76, 1.06)$ Error cuadrático: 0.004239	<p>Grafica 1. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calera-Trituradora.</p>  <p>Fuente: Resultados del estudio.</p>
Test Chi cuadrado Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 0.323 p-value: <0.005	
Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.099 p-value: >0.15	

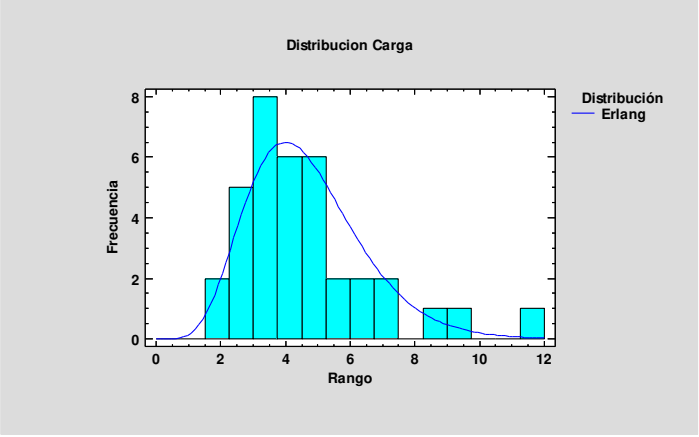
Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos para transporte desde la cantera Calera hasta la trituradora es una distribución Weibull (*) con expresión $11+WEIB(1.76,1.06)$.

* Distribución de probabilidad continua, se describe según los parámetros de forma, escala y valor de umbral.

4.3.1.2. Carga. Para los tiempos de carga en la cantera Calera se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 4. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calera.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Erlang Expresión: 2 + ERLA(1.34, 2) Error cuadrático: 0.005720 Media: 4.67 Desviación estándar: 2.03	<p>Grafica 2. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calera.</p>  <p>Fuente: Resultados del estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado</p> Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 1.11 p-value: <0.005	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov</p> Test estadístico: 0.0822 p-value: >0.15	

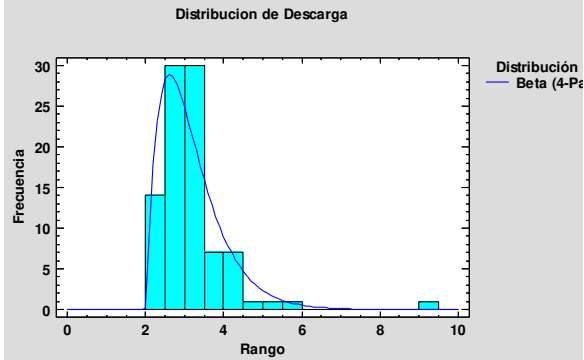
Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de carga en Calera es una distribución Erlang (*) con expresión 2 + ERLA(1.34, 2).

* Es una distribución de probabilidad continua, que tiene un valor positivo para todos los números reales mayores que cero y está dada por dos parámetros: la forma k, que es un entero no negativo, y la tasa λ , que es un número real no negativo.

4.3.1.3. Descarga. Para los tiempos de descarga en la trituradora se establece la prueba de hipótesis con un α de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 5. Distribución Beta para tiempos de descarga.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Beta Expresión: $2+7.72*BETA(2.42, 12.9)$ Error cuadrático: 0.006548 Media: 3.17 Desviación estándar: 0.916	<p>Grafica 3. Distribución Beta para tiempos de descarga.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 4.75 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.0961 p-value: >0.15</p>	

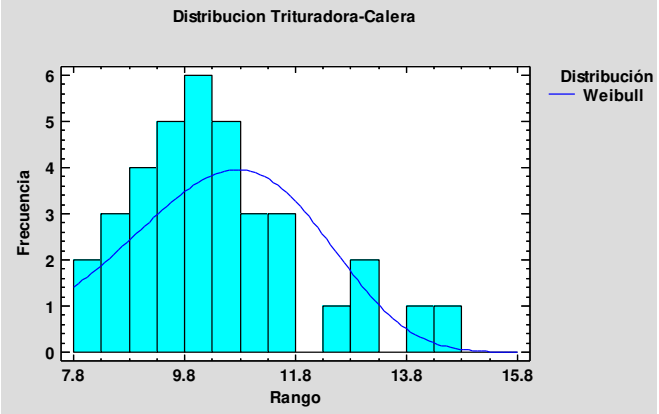
Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de descarga es la distribución Beta (*) con expresión $2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)$

* Es una distribución de probabilidad continua, definida por dos parámetros de forma (α y β) en el intervalo cerrado $0 \leq X \leq 1$.

4.3.1.4. Trituradora-Calera. Para los tiempos de transporte desde la trituradora hacia el frente Calera se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 6. Distribución Weibull para tiempos de transporte Trituradora-Calera.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Weibull Expresión: $8 + WEIB(2.59, 1.51)$ Error cuadrático: 0.003524 Media: 10.3 Desviación estándar: 1.58	<p>Grafica 4. Distribución Weibull para tiempos de transporte Trituradora-Calera.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 4 Grados de libertad: 1 Test estadístico: 0.443 p-value: 0.509</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.0763 p-value: >0.15</p>	

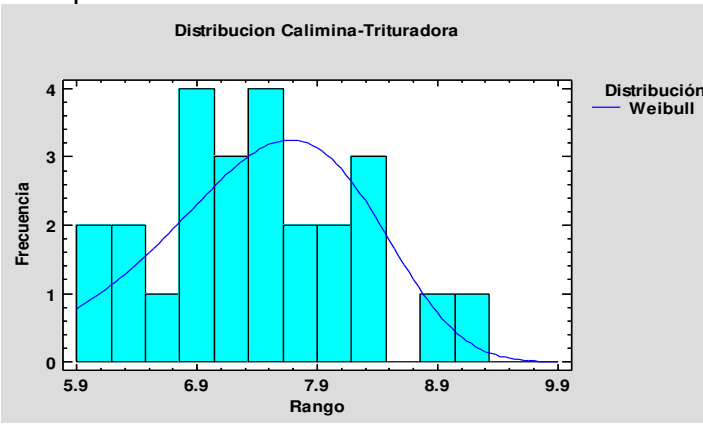
Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de transporte desde la trituradora hasta el frente Calera es una distribución Weibull con expresión $8 + WEIB(2.59, 1.51)$.

4.3.2. Cantera Calimina

4.3.2.1. Calimina-Trituradora. Para los tiempos de transporte desde el frente Calimina hacia la trituradora se establece la prueba de hipótesis con un α de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 7. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calimina-Trituradora.

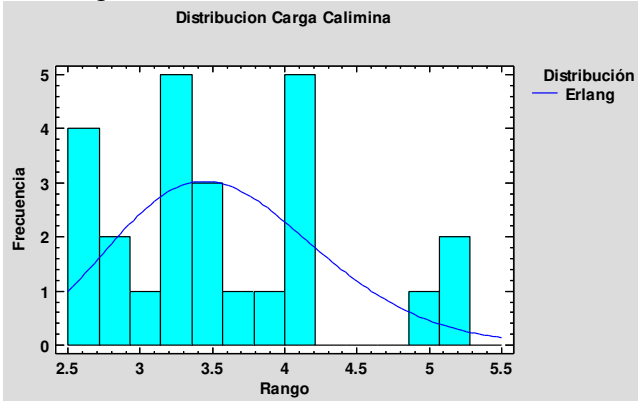
RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Weibull Expresión: $6 + WEIB(1.55, 1.69)$ Error cuadrático: 0.002583 Media: 7.4 Desviación estándar: 0.827	<p>Grafica 5. Distribución Weibull para tiempos de transporte Calimina-Trituradora.</p>  <p style="text-align: center;">Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 0.261 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.069 p-value: >0.15</p>	

Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de transporte desde el frente Calimina hasta la trituradora es una distribución Weibull con expresión $6 + WEIB(1.55, 1.69)$

4.3.2.2. Carga. Para los tiempos de carga en el frente Calimina se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 8. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calimina.

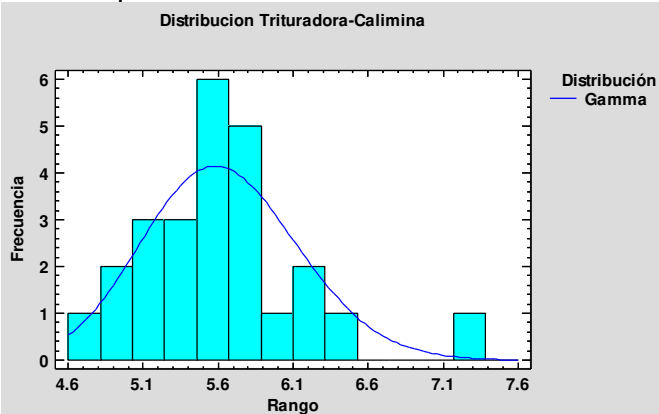
RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Erlang Expresión: $2.39 + \text{ERLA}(0.599, 2)$ Error cuadrático: 0.021893 Media: 3.59 Desviación estándar: 0.76	<p>Grafica 6. Distribución Erlang para tiempos de carga en Calimina.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 0.809 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.084 p-value: >0.15</p>	

Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de carga en el frente Calimina es una distribución Erlang con expresión $2.39 + \text{ERLA}(0.599, 2)$.

4.3.2.3. Trituradora-Calimina. Para los tiempos transporte desde la trituradora hasta el frente Calimina se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 9. Distribución Gamma para tiempos de transporte Trituradora-Calimina.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Gamma Expresión: $4.52 + \text{GAMM}(0.257, 4.32)$ Error cuadrático: 0.007053 Media: 5.63 Desviación estándar: 0.543	<p>Grafica 7. Distribución Gamma para tiempos de transporte Trituradora-Calimina.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 2 Grados de libertad: -1 Test estadístico: 0.0731 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.0785 p-value: >0.15</p>	

Fuente: Resultados del estudio.

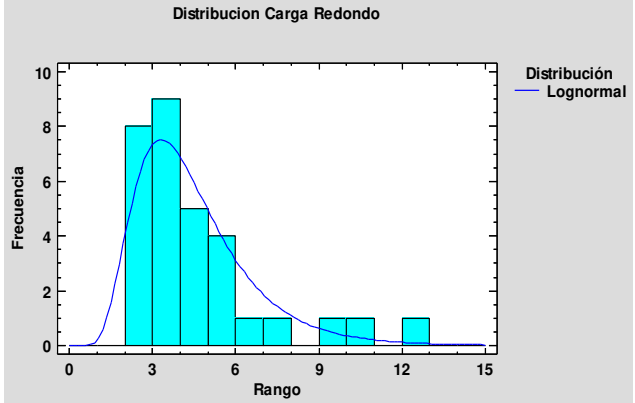
Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de transporte desde la trituradora hasta el frente Calimina es una distribución Gamma (*) con expresión $4.52 + \text{GAMM}(0.257, 4.32)$.

* Es una distribución de probabilidad continua adecuada para modelizar el comportamiento de variables aleatorias continuas con asimetría positiva. En su expresión se encuentran dos parámetros siempre positivos (α y β), de los que depende su forma y alcance por la derecha.

4.3.3. Cantera Redondo

4.3.3.1. **Carga.** Para los tiempos de carga en el frente Redondo se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 10. Distribución Lognormal para tiempos de carga en redondo.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Lognormal Expresión: $2 + \text{LOGN}(2.77, 3.87)$ Error cuadrático: 0.005021 Media: 4.52 Desviación estándar: 2.44	<p>Grafica 8. Distribución Lognormal para tiempos de carga en Redondo.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 2 Grados de libertad: -1 Test estadístico: 0.372 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.128 p-value: >0.15</p>	

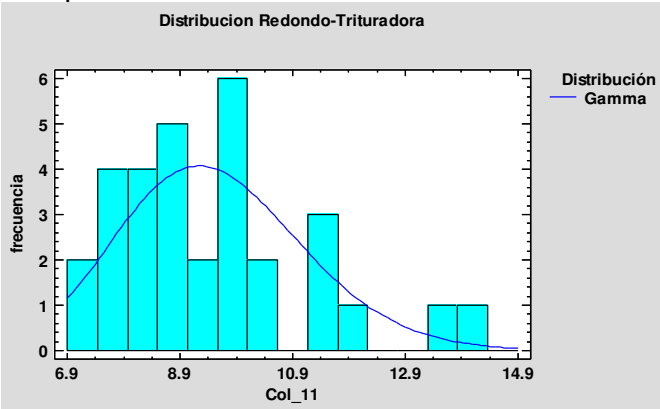
Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de carga en el frente Redondo es una distribución Lognormal (*) con expresión $2 + \text{LOGN}(2.77, 3.87)$.

* Es una distribución de probabilidad de una variable aleatoria cuyo logaritmo esta normalmente distribuido. Si una variable X sigue una distribución lognormal entonces la variable $\ln X$ se distribuye normalmente.

4.3.3.2. Redondo-Trituradora. Para los tiempos de transporte desde el frente Redondo hasta la trituradora se establece la prueba de hipótesis con un α de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 11. Distribución Gamma para tiempos de transporte Redondo-Trituradora.

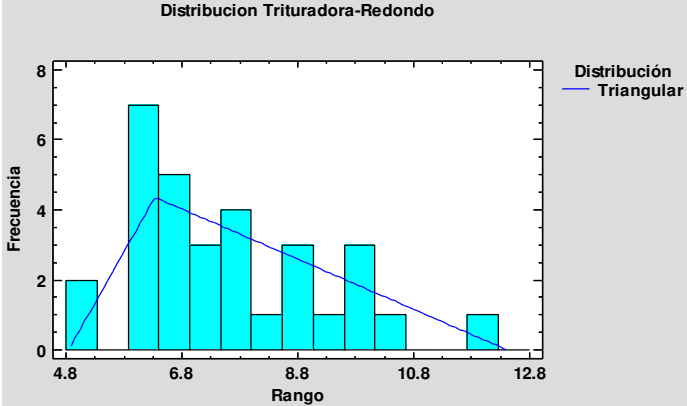
RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Gamma Expresión: $7 + \text{GAMM}(1.26, 2)$ Error cuadrático: 0.008931 Media: 9.52 Desviación estándar: 1.73	<p>Grafica 9. Distribución Gamma para tiempos de transporte Redondo-Trituradora.</p>  <p>Fuente: Resultados del Estudio.</p>
<p>Test Chi cuadrado Número de intervalos: 3 Grados de libertad: 0 Test estadístico: 0.673 p-value: <0.005</p>	
<p>Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.0697 p-value: >0.15</p>	

Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de transporte desde el frente Redondo hasta la trituradora es una distribución Gamma con expresión $7 + \text{GAMM}(1.26, 2)$.

4.3.3.3. Trituradora-Redondo. Para los tiempos de transporte desde la trituradora hasta el frente Redondo se establece la prueba de hipótesis con un alpha de 0.1, es decir con un nivel de confianza del 90%.

Tabla 12. Distribución Triangular para tiempos de transporte Trituradora-Redondo.

RESULTADOS	GRAFICA
Distribución: Triangular Expresión: TRIA(5, 5.8, 12) Error cuadrático: 0.002084 Media: 7.6 Desviación estándar: 1.62	<p>Grafica 10. Distribución Triangular para tiempos de transporte Trituradora-Redondo.</p>  <p style="text-align: center;">Distribucion Trituradora-Redondo</p> <p style="text-align: center;">Fuente: Resultados del Estudio.</p>
Test Chi cuadrado Número de intervalos: 4 Grados de libertad: 2 Test estadístico: 0.194 p-value: <0.75	
Test Kolmogorov-Smirnov Test estadístico: 0.123 p-value: >0.15	

Fuente: Resultados del estudio.

Dado que el valor de p (valor de probabilidad) en el test de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.1, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la distribución más ajustada al comportamiento de los tiempos de transporte desde la trituradora hasta el frente Redondo es una distribución Triangular (*) con expresión TRIA(5, 5.8, 12).

* Es una distribución de probabilidad continua, que tiene un valor mínimo (a), un valor máximo (b) y una moda (c).

5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Una vez identificados y obtenidos los datos necesarios para elaborar el modelo computacional en el software de simulación, se procede a la construcción del modelo. Se hace necesaria la construcción de dos modelos, teniendo en cuenta la utilización de las palas cargadoras, en cada modelo que se construirá se irán agregando en cada paso mayores detalles para aumentar su complejidad, agregando etapas del sistema de producción, cargue y transporte hasta llegar al modelo final.

5.1. MODELO USANDO UNA PALA CARGADORA EN CADA FRENTE DE EXPLOTACIÓN

Este modelo se conformara por tres frentes de explotación independientes, donde se llevara a cabo la extracción del mineral, su posterior cargue y transporte, y una planta, donde se llevara a cabo el proceso de trituración, además allí se realizara la verificación de calidad del mineral: 35% caliza de alta calidad y 65% de caliza de baja calidad, para así poder dirigir la flota de transporte a los diferentes frentes, con el fin de cumplir con la calidad requerida. En este modelo se usa una pala cargadora en cada frente de explotación. Los datos de tiempo y velocidad extraídos del capítulo anterior están resumidos en la tabla 13.

Tabla 13. Datos de tiempo y velocidad.

Cantera	Carga	A trituradora	Descarga	A cantera	Distancia	Vel. A trituradora	Vel. A Cantera
Calera	2+ERLA (1.34,2)	11+WEIB (1.76,1.06)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	8+WEIB (2.59,1.51)	6 km	28.3km/h	34.8km/h
Calimina	2.39+ERLA (0.599,2)	6+WEIB (1.55,1.69)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	4.52+GAMM (0.257,4.32)	3 km	24.4km/h	31.9km/h
Redondo	2+LOGN (2.77,3.87)	7+GAMM (1.26,2)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	TRIA (5,5.8,12)	4 km	25.2km/h	31.7km/h

Fuente: Resultados del Estudio.

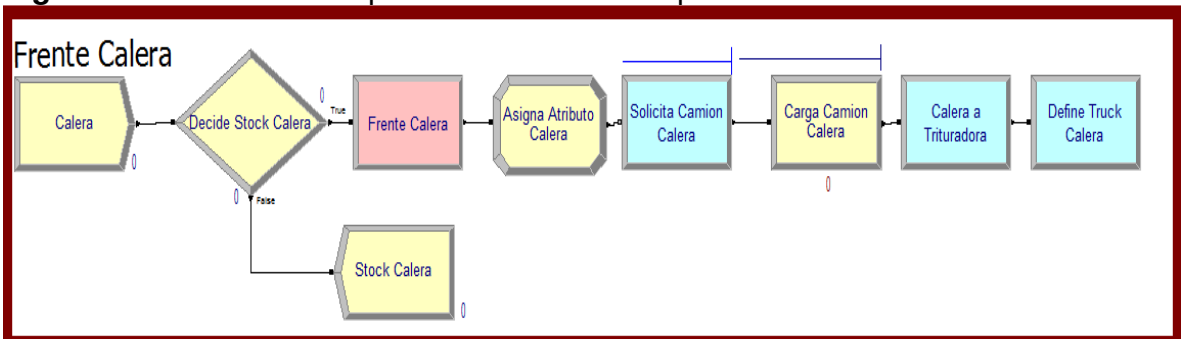
5.1.1. Frentes de Explotación. La cantera está conformada por tres frentes de explotación, para su construcción en el software Arena se utilizaran 9 módulos para cada frente (Ver Figuras 15, 16, 17), estos módulos involucran desde la disponibilidad de mineral para ser cargado hasta el transporte hacia la estación de la trituradora.

Figura 15. Frente Redondo para modelo con tres palas cargadoras.



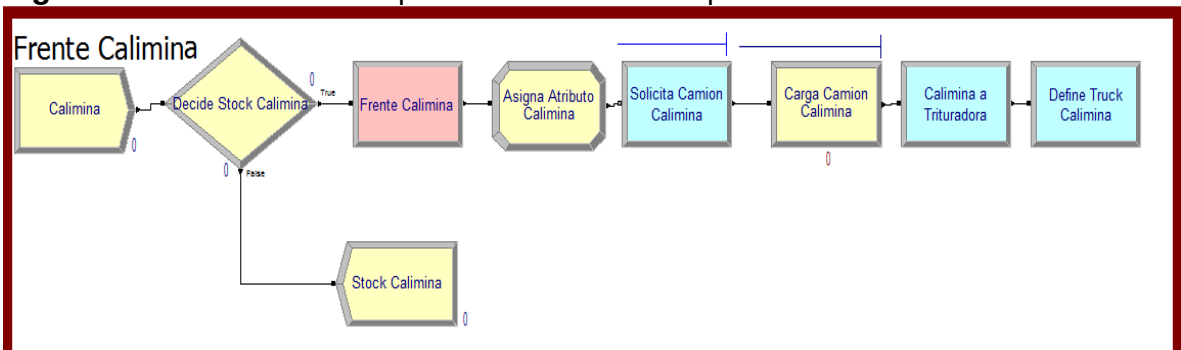
Fuente: Datos de Estudio.

Figura 16. Frente Calera para modelo con tres palas.



Fuente: Datos de Estudio.

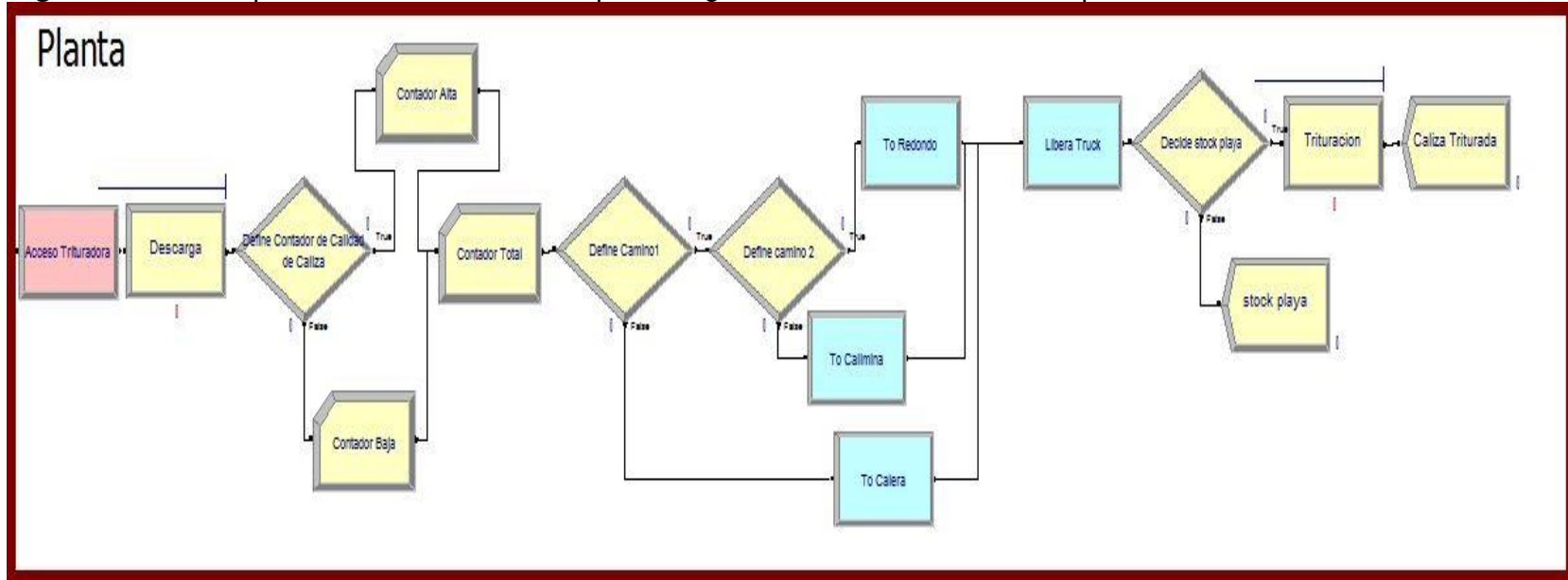
Figura 17. Frente Calimina para modelo con tres palas.



Fuente: Datos de Estudio

5.1.2. Planta. En el proyecto la planta consta de la estación de la trituradora hasta el proceso de trituración y está conformada por 16 módulos, en este sector se evalúa el porcentaje de mineral que entra y así poder direccionar los camiones a los diferentes frentes de explotación y poder cumplir con los porcentajes de calidad de caliza que deben entrar en la trituradora, baja calidad 65% y alta calidad 35%.(Ver Figura 18).

Figura 18. Planta para modelo usando una pala cargadora en cada frente de explotación.



Fuente: Datos de estudio.

5.2. MODELO USANDO UNA PALA CARGADORA PARA LOS TRES FRENTE DE EXPLOTACIÓN

Este modelo se conformara por tres frentes de explotación independientes, donde se llevara a cabo la extracción del mineral, su posterior cargue y transporte, y una planta, donde se llevara a cabo el proceso de trituración, además allí se realizara la verificación de calidad del mineral: 35% caliza de alta calidad y 65% de caliza de baja calidad para así poder dirigir la flota de transporte a los diferentes frentes.

En este modelo se usa una pala cargadora para los tres frentes de explotación, esta pala se desplazara a los diferentes frentes de explotación para cumplir con los porcentajes de calidad de caliza necesitada en planta. Los datos de tiempo y velocidad extraídos del capítulo anterior están resumidos en la tabla 14.

Esto significa que habrán dos recursos dinámicos: flota de transporte y la pala cargadora, que tendrán que dirigirse a los diferentes frentes de explotación, donde la flota de transporte conformada por cinco camiones, competirá por el recurso pala, el desplazamiento de los dos recursos por el sistema estará encaminado a cumplir con los requerimientos de calidad necesitada en planta.

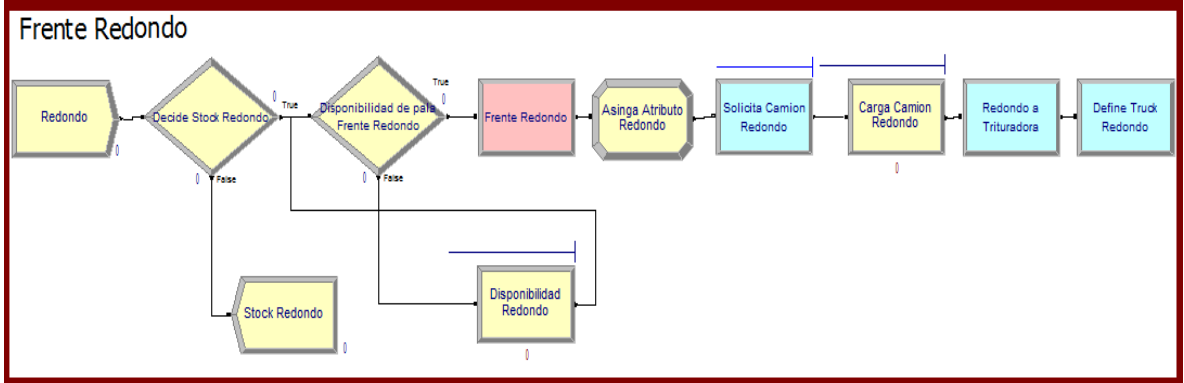
Tabla 14. Datos de tiempo y velocidad para modelo con una pala cargadora.

Cantera	Carga	A trituradora	Descarga	A cantera	Distancia	Vel. A trituradora	Vel. A Cantera
Calera	2+ERLA (1.34,2)	11+WEIB (1.76,1.06)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	8+WEIB (2.59,1.51)	6 km	28.3km/h	34.8km/h
Calimina	2.39+ERLA (0.599,2)	6+WEIB (1.55,1.69)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	4.52+GAMM (0.257,4.32)	3 km	24.4km/h	31.9km/h
Redondo	2+LOGN (2.77,3.87)	7+GAMM (1.26,2)	2 + 7.72 * BETA(2.42, 12.9)	TRIA (5,5.8,12)	4 km	25.2km/h	31.7km/h

Fuente: Resultados del estudio.

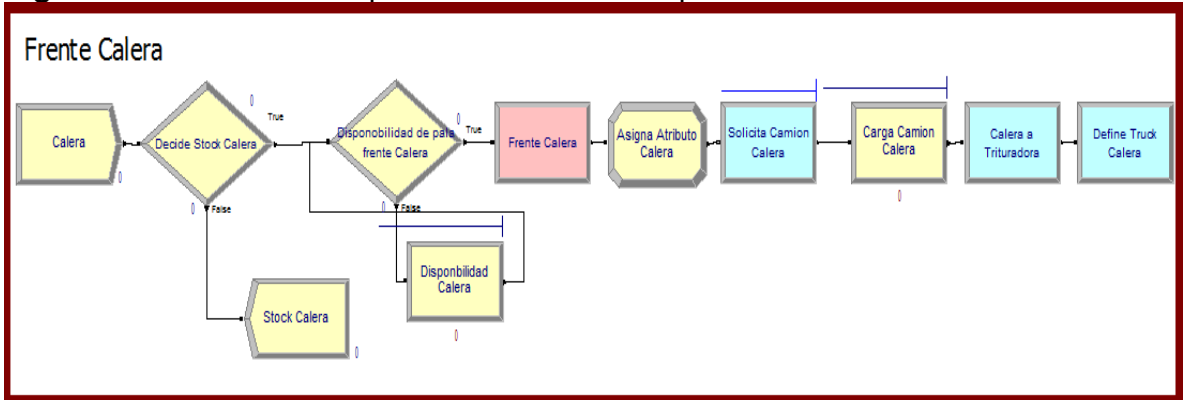
5.2.1. Frentes de Explotación. La cantera está conformada por tres frentes de explotación, para su construcción en el software Arena se utilizaran 11 módulos para cada uno (Ver Figuras 19, 20, 21), estos módulos involucran desde la disponibilidad de mineral para ser cargado hasta el transporte hacia la estación de la trituradora.

Figura 19. Frente Redondo para modelo con una pala.



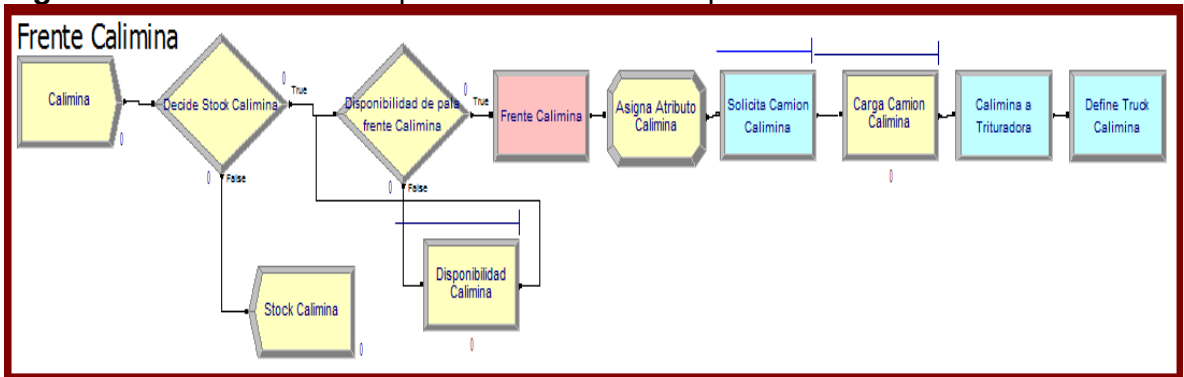
Fuente: Datos de Estudio.

Figura 20. Frente Calera para modelo con una pala.



Fuente: Datos de Estudio.

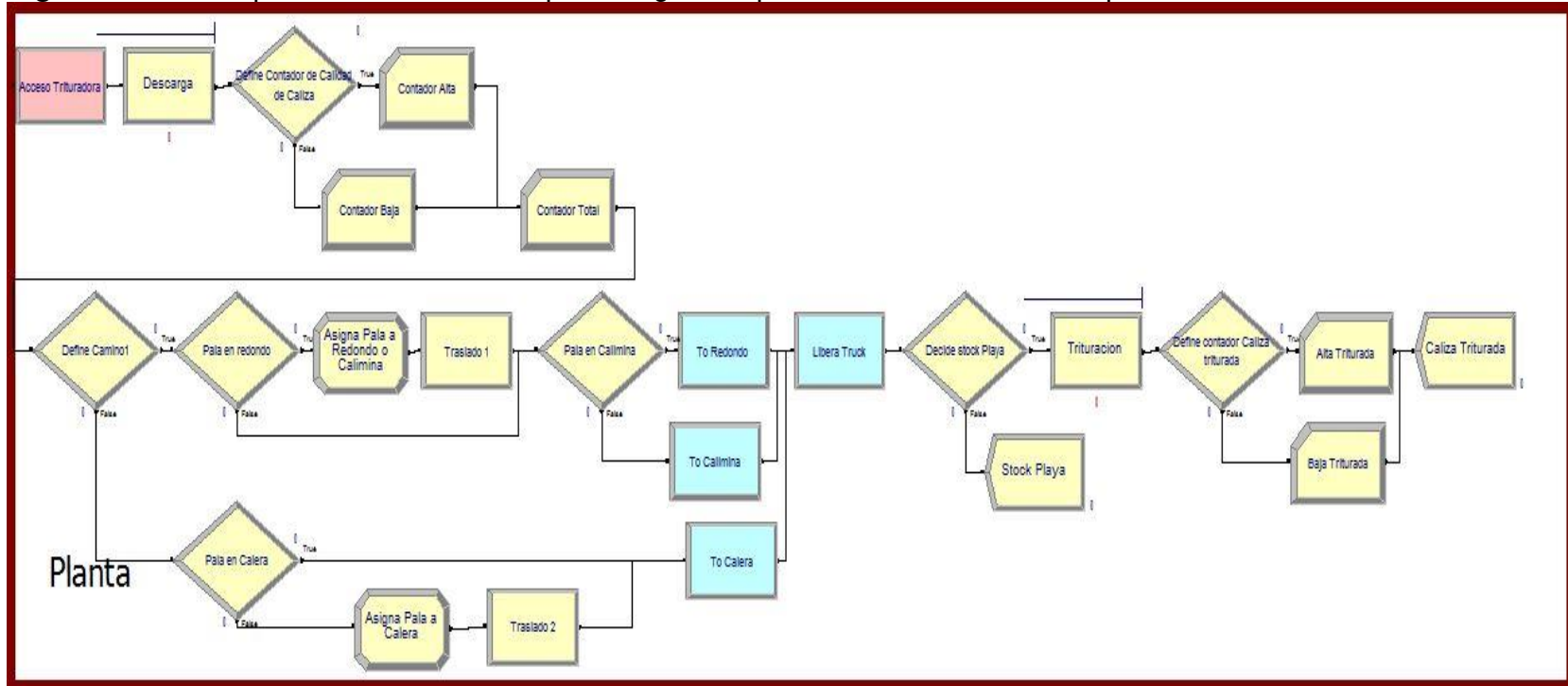
Figura 21. Frente Calimina para modelo con una pala.



Fuente: Datos de Estudio.

5.2.2. Planta. En el modelo la planta estará conformada por la estación de la trituradora hasta el proceso de trituración, en este sector se evaluará el porcentaje de mineral que entra, para así poder direccionar los camiones a los diferentes frentes de explotación y cumplir con los porcentajes de calidad de caliza que deben entrar en la trituradora, baja calidad 65% y alta calidad 35%, además se evaluarán estos porcentajes para direccionar la pala cargadora al frente del cual se necesita caliza de la calidad requerida. (Ver Figura 22).

Figura 22. Planta para modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

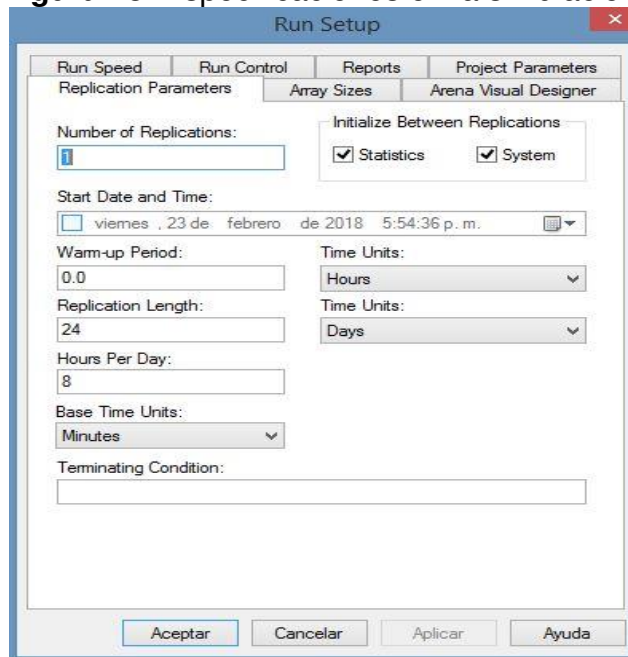


Fuente: Datos de estudio.

6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La simulación en los dos modelos se realizara para 24 días hábiles laborales del mes de Marzo del año 2018 según calendario de la República Argentina, la jornada laboral será de 8 horas diarias, es decir la simulación se realizara para 11520 minutos. (Ver Figura 23).

Figura 23. Especificaciones en la simulación.



Fuente: Datos de Estudio.

6.1. RESULTADOS PARA MODELO CON UNA PALA CARGADORA EN CADA FRENTE DE EXPLOTACIÓN

Los resultados para el modelo usando una pala cargadora en cada frente de explotación ofrecen gran variedad de información detallada que debe ser interpretada correctamente para evaluar el modelo.

- **Entidades**

Contiene resultados de tiempos y otros resultados:

Los resultados de tiempo contienen información sobre la media, el intervalo de confianza y los valores mínimos y máximos con respecto a las diferentes categorías de tiempo, que son: (Ver Figura 24).

VA Time: Tiempo de valor agregado
NVA Time: Tiempo de valor no agregado
Wait Time: Tiempo de esperas
Transfer Time: Tiempo de transferencias o transportes
Other Time: Otros tiempos
Total Time: Tiempo total o en el sistema

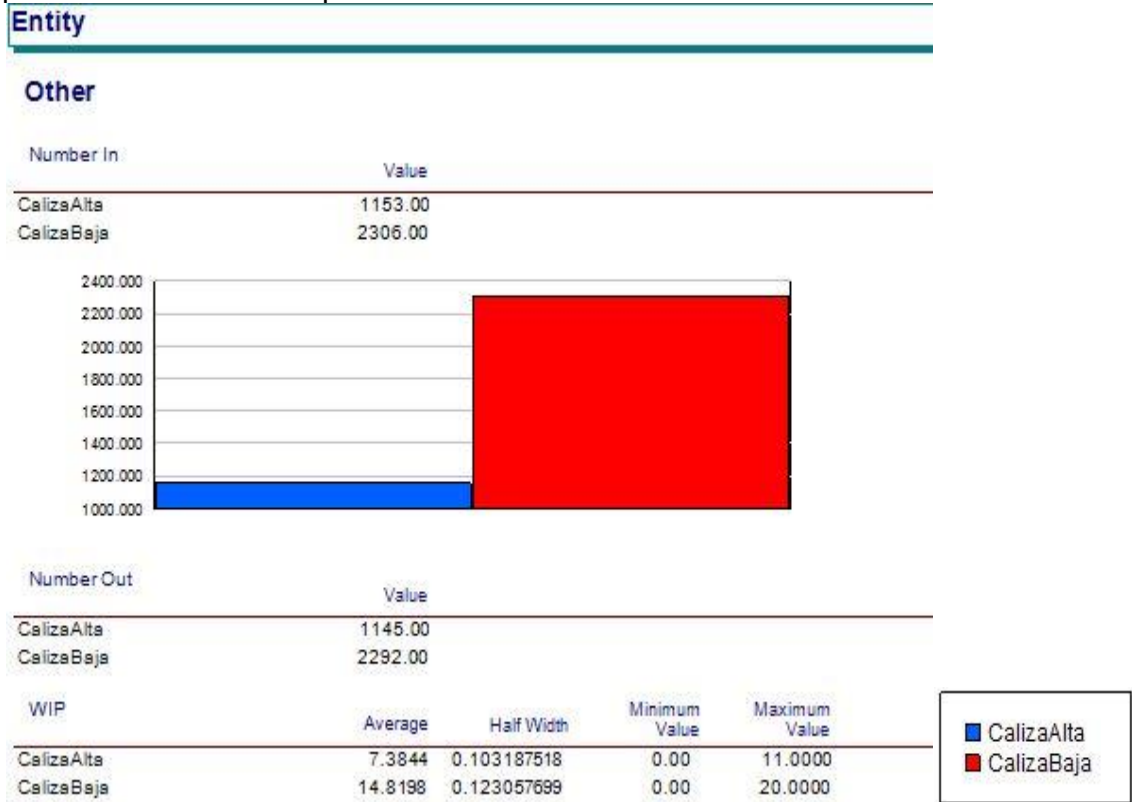
Figura 24. Estadísticas de tiempo para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.

Entity				
Time				
VA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	8.7982	0.138165960	0.00	24.1571
CalizaBaja	7.5241	0.110238689	0.00	48.0389
NVA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	0.00	0.000000000	0.00	0.00
CalizaBaja	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Wait Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	51.8342	0.780288730	0.00	113.73
CalizaBaja	56.7542	0.983963959	0.00	233.83
Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	13.2088	0.173471018	0.00	23.0657
CalizaBaja	9.8728	(Correlated)	0.00	19.8686
Other Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	0.00	0.000000000	0.00	0.00
CalizaBaja	0.00	0.000000000	0.00	0.00
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	73.8412	0.867057105	0.00	148.92
CalizaBaja	74.1511	1.03969	0.00	268.62

Fuente: Resultados del Estudio.

Los resultados de otras estadísticas contienen información acerca de las entidades que entran al sistema (NumberIn), el número de entidades que salen del sistema (NumberOut) y el número de entidades que se encuentran en el sistema (WIP) por cada tipo de entidad (Ver Grafica 11).

Grafica 11. Estadísticas de entidades en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.



Fuente: Resultados del Estudio.

- **Colas**

Este reporte muestra la recolección de estadísticas de tiempo y número de entidades para todas las esperas registradas en el modelo, se divide en dos secciones que corresponde a cada espera: tiempo y otras estadísticas. (Ver Figura 25).

En la sección tiempo se proveen estadísticas tales como media, intervalo de confianza y valores máximo y mínimo para el tiempo de espera en una cola determinada.

En la sección de otras estadísticas se proveen estadísticas como media, intervalo de confianza y valores máximos y mínimos para el número de entidades en espera (longitud de cola) en una fila determinada.

Figura 25. Estadísticas de colas en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.

Queue

Time

Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Carga Camion Calers.Queue	1.4551	0.306275269	0.00	16.1574
Carga Camion Calimina.Queue	0.2134	0.063773203	0.00	6.8804
Carga Camion Redondo.Queue	1.0507	(Correlated)	0.00	32.1925
Descarga.Queue	0.7880	0.071654876	0.00	7.7301
Solicita Camion Calers.Queue	72.2763	1.51493	0.00	106.74
Solicita Camion Calimina.Queue	76.7467	6.66876	0.00	200.39
Solicita Camion Redondo.Queue	95.3595	6.71455	0.00	225.30
Trituracion.Queue	6.2680	0.261106660	0.00	11.5334

Other

Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Carga Camion Calers.Queue	0.0956	0.022326224	0.00	3.0000
Carga Camion Calimina.Queue	0.01404130	(Insufficient)	0.00	2.0000
Carga Camion Redondo.Queue	0.05864341	0.027296822	0.00	3.0000
Descarga.Queue	0.1473	0.013628809	0.00	3.0000
Solicita Camion Calers.Queue	4.7555	0.081866352	0.00	6.0000
Solicita Camion Calimina.Queue	5.0733	0.126858966	0.00	6.0000
Solicita Camion Redondo.Queue	5.3425	0.100674870	0.00	6.0000
Trituracion.Queue	1.0598	0.054275911	0.00	2.0000

Fuente: Resultados del Estudio.

- **Recursos**

En este reporte se muestran estadísticas que usan los diferentes recursos empleados en el modelo, se divide en dos secciones que corresponden a cada recurso: uso y otras estadísticas.

En la sección Uso (Usage) se proveen estadísticas como media, intervalo de confianza y valores máximo y mínimo para el número de unidades de recurso ocupadas (Number busy), el número de unidades programadas (Number Scheduled) y la utilización. (Ver Figura 26).

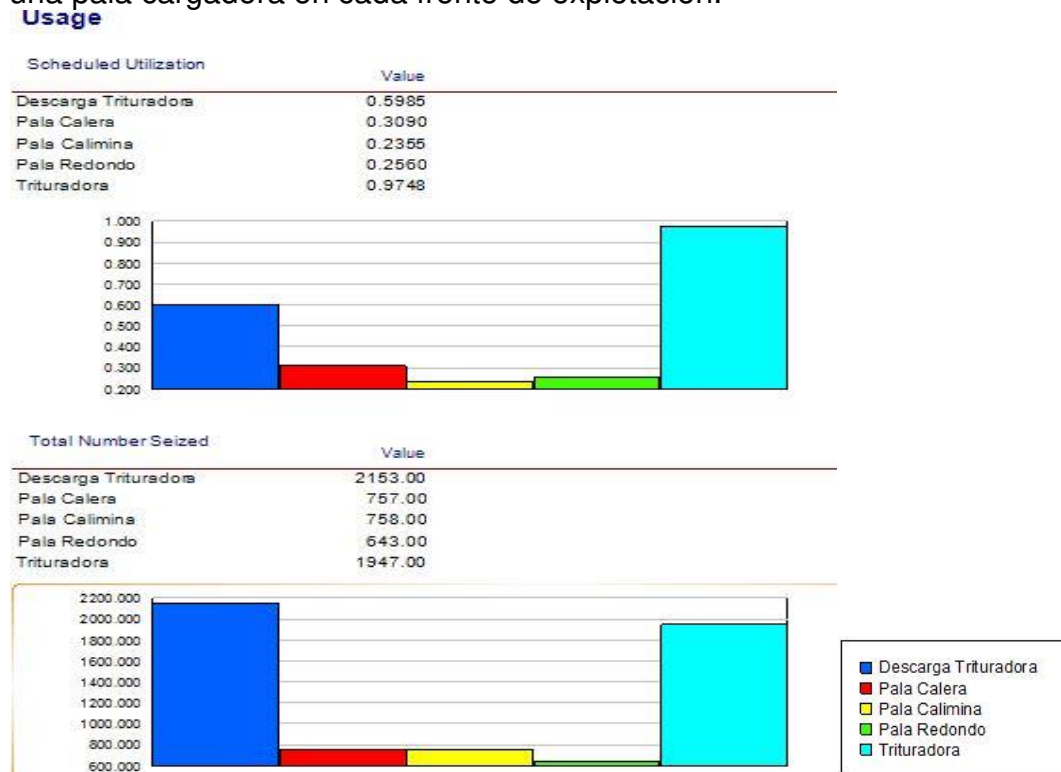
En la sección de otras estadísticas, se proveen estadísticas sobre el número de veces que una entidad toma control del recurso y la utilización programada del recurso (Scheduled Utilization). (Ver Grafica 12).

Figura 26. Estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.

Resource				
Usage				
Instantaneous Utilization	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	0.5985	0.009717115	0.00	1.0000
Pala Calera	0.3090	0.011080861	0.00	1.0000
Pala Calimina	0.2355	0.013284164	0.00	1.0000
Pala Redondo	0.2560	0.025767891	0.00	1.0000
Trituradora	0.9748	(Insufficient)	0.00	1.0000
Number Busy	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	0.5985	0.009717115	0.00	1.0000
Pala Calera	0.3090	0.011080861	0.00	1.0000
Pala Calimina	0.2355	0.013284164	0.00	1.0000
Pala Redondo	0.2560	0.025767891	0.00	1.0000
Trituradora	0.9748	(Insufficient)	0.00	1.0000
Number Scheduled	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Calera	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Calimina	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Redondo	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Trituradora	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000

Fuente: Resultados del Estudio.

Grafica 12. Otras estadísticas de uso de recursos para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.

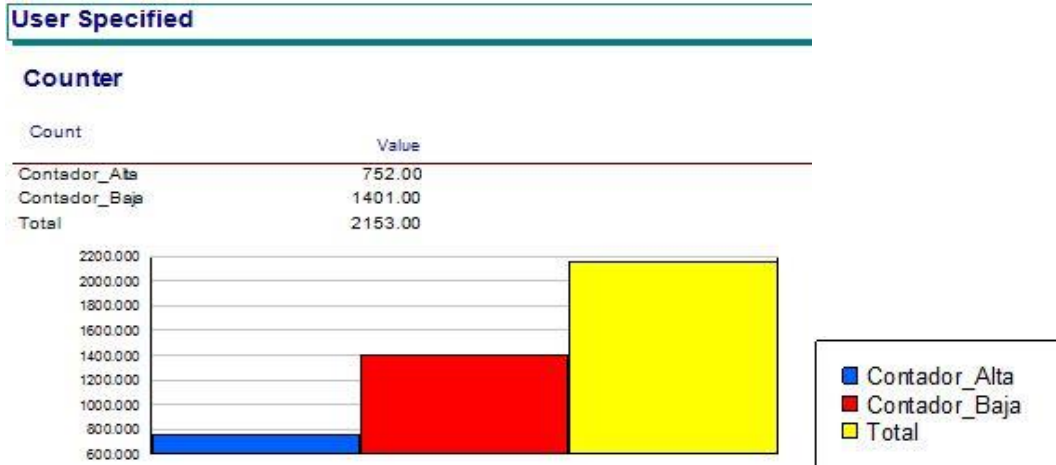


Fuente: Resultados del Estudio.

- **Uso específico**

En este reporte se muestran estadísticas sobre módulos específicos que se hayan programado, en este caso contadores (Counter) de calidad de caliza. (Ver Grafica 13).

Grafica 13. Estadísticas de uso específico para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.



Fuente: Resultados del Estudio.

6.2. RESULTADOS PARA MODELO CON UNA PALA CARGADORA PARA LOS TRES FRENTES DE EXPLOTACIÓN

Los resultados para el modelo usando una pala cargadora para los tres frentes de explotación, ofrecen gran variedad de información detallada que debe ser interpretada correctamente para evaluar el modelo.

- **Entidades**

Contiene resultados de tiempos y otros resultados. Los resultados de tiempo contienen información sobre la media, el intervalo de confianza y los valores mínimos y máximos con respecto a las diferentes categorías de tiempo que son: (Ver Figura 27).

VA Time: Tiempo de valor agregado

NVA Time: Tiempo de valor no agregado

Wait Time: Tiempo de esperas

Transfer Time: Tiempo de transferencias o transportes

Other Time: Otros tiempos

Figura 27. Estadísticas de tiempo en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Time

VA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	15.8512	(Correlated)	0.00	126.35
CalizaBaja	13.0155	1.96182	0.00	284.94

NVA Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	0.00	0.000000000	0.00	0.00
CalizaBaja	0.00	0.000000000	0.00	0.00

Wait Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	69.2885	3.26991	0.00	277.94
CalizaBaja	42.4252	11.43544	0.00	1544.99

Transfer Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	11.2603	0.460238839	0.00	23.0657
CalizaBaja	8.0459	0.314037429	0.00	19.8686

Other Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	0.8049	0.087798325	0.00	10.0000
CalizaBaja	0.4810	0.042326175	0.00	12.0000

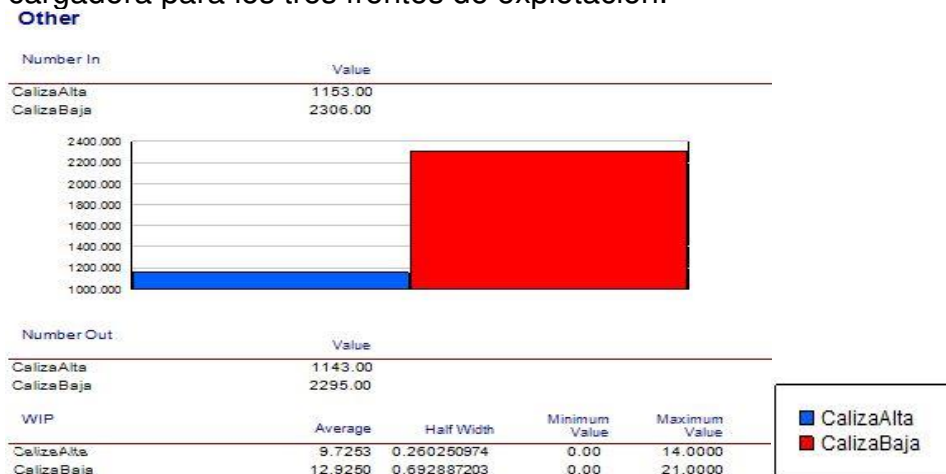
Total Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	97.2049	3.89553	0.00	351.09
CalizaBaja	63.9676	13.59040	0.00	1846.06

Other

Fuente: Resultados del Estudio.

Los resultados de otras estadísticas, contienen información acerca de las entidades que entran al sistema (NumberIn), el número de entidades que salen del sistema (NumberOut) y el número de entidades que se encuentran en el sistema (WIP) por cada tipo de entidad (Ver Grafica 14).

Grafica 14. Estadísticas de entidades en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.



Fuente: Resultados del Estudio.

- **Colas**

Este reporte muestra la recolección de estadísticas de tiempo y número de entidades para todas las esperas registradas en el modelo, se divide en dos secciones que corresponde a cada espera: tiempo y otras estadísticas. (Ver Figura 28).

En la sección tiempo se proveen estadísticas tales como media, intervalo de confianza y valores máximo y mínimo para el tiempo de espera en una cola determinada.

En la sección de otras estadísticas se proveen estadísticas como media, intervalo de confianza y valores máximos y mínimos para el número de entidades en espera (longitud de cola) en una fila determinada.

Figura 28. Estadísticas de colas en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Queue				
Time				
Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Carga Camion Calera.Queue	1.6937	0.251934286	0.00	15.6653
Carga Camion Calimina.Queue	0.5216	0.073891679	0.00	7.7412
Carga Camion Redondo.Queue	2.5669	(Insufficient)	0.00	19.1515
Descarga.Queue	0.4608	0.040583933	0.00	6.8510
Disponibilidad Calera.Queue	10.4166	0.857472874	0.00	18.0000
Disponibilidad Calimina.Queue	10.9636	1.57257	0.00	18.0000
Disponibilidad Redondo.Queue	16.0441	0.761192658	0.00	18.0000
Solicita Camion Calera.Queue	62.5191	7.28966	0.00	153.43
Solicita Camion Calimina.Queue	8.2785	1.58492	0.00	32.7127
Solicita Camion Redondo.Queue	34.6498	(Insufficient)	0.00	356.07
Trituracion.Queue	5.1990	(Correlated)	0.00	11.5241
Other				
Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Carga Camion Calera.Queue	0.0984	0.016200136	0.00	3.0000
Carga Camion Calimina.Queue	0.04188234	0.007784035	0.00	2.0000
Carga Camion Redondo.Queue	0.06974173	0.035972269	0.00	4.0000
Descarga.Queue	0.07619489	(Correlated)	0.00	3.0000
Disponibilidad Calera.Queue	2.8071	0.406387128	0.00	6.0000
Disponibilidad Calimina.Queue	1.6188	0.630792000	0.00	6.0000
Disponibilidad Redondo.Queue	4.6469	(Insufficient)	0.00	6.0000
Solicita Camion Calera.Queue	3.6307	0.590380904	0.00	12.0000
Solicita Camion Calimina.Queue	0.6647	0.126967324	0.00	7.0000
Solicita Camion Redondo.Queue	0.9414	0.366095523	0.00	8.0000
Trituracion.Queue	0.7916	0.039171245	0.00	2.0000

Fuente: Resultados del Estudio.

- **Recursos**

En este reporte se muestran estadísticas que usan los diferentes recursos empleados en el modelo, se divide en dos secciones que corresponden a cada recurso: uso y otras estadísticas.

En la sección Uso (Usage) se proveen estadísticas como media, intervalo de confianza y valores máximo y mínimo para el número de unidades de recurso ocupadas (Number busy), el número de unidades programadas (Number Scheduled) y la utilización. (Ver Figura 29).

Figura 29. Estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Usage

Instantaneous Utilization	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	0.5323	0.013828183	0.00	1.0000
Pala Calera	0.2707	0.012822856	0.00	1.0000
Pala Calimina	0.2857	0.037131356	0.00	1.0000
Pala Redondo	0.1249	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf1	0.8679	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf2	0.8069	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf3	0.4430	(Insufficient)	0.00	1.0000
Trituradora	0.8779	0.022512850	0.00	1.0000

Number Busy	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	0.5323	0.013828183	0.00	1.0000
Pala Calera	0.2707	0.012822856	0.00	1.0000
Pala Calimina	0.2857	0.037131356	0.00	1.0000
Pala Redondo	0.1249	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf1	0.8679	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf2	0.8069	(Insufficient)	0.00	1.0000
rpf3	0.4430	(Insufficient)	0.00	1.0000
Trituradora	0.8779	0.022512850	0.00	1.0000

Number Scheduled	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Descarga Trituradora	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Calera	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Calimina	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Pala Redondo	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
rpf1	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
rpf2	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
rpf3	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000
Trituradora	1.0000	(Insufficient)	1.0000	1.0000

Fuente: Resultados del Estudio.

En la sección de otras estadísticas se proveen estadísticas sobre el número de veces que una entidad toma control del recurso y la utilización programada del recurso (Scheduled Utilization). (Ver Grafica 15).

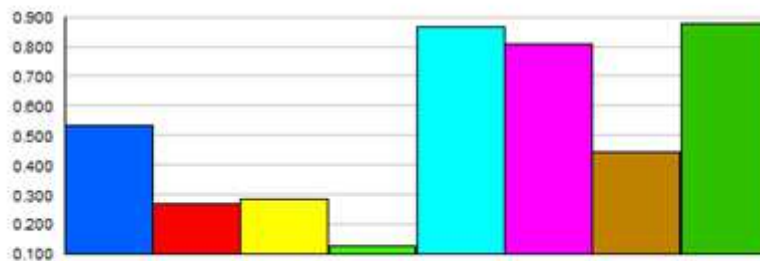
Grafica 15. Otras estadísticas de uso de recursos en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Resource

Usage

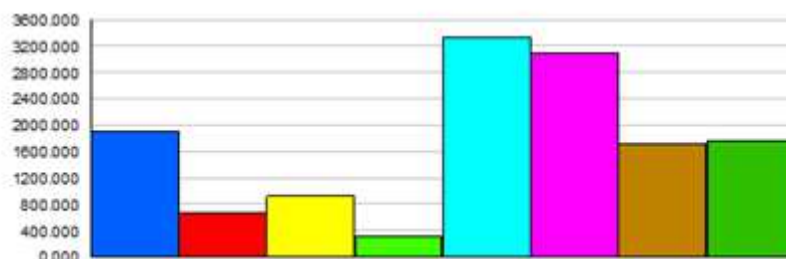
Scheduled Utilization

	Value
Descarga Trituradora	0.5323
Pala Calera	0.2707
Pala Calimina	0.2857
Pala Redondo	0.1249
rpf1	0.8679
rpf2	0.8069
rpf3	0.4430
Trituradora	0.8779



Total Number Seized

	Value
Descarga Trituradora	1905.00
Pala Calera	669.00
Pala Calimina	925.00
Pala Redondo	313.00
rpf1	3333.00
rpf2	3099.00
rpf3	1701.00
Trituradora	1753.00



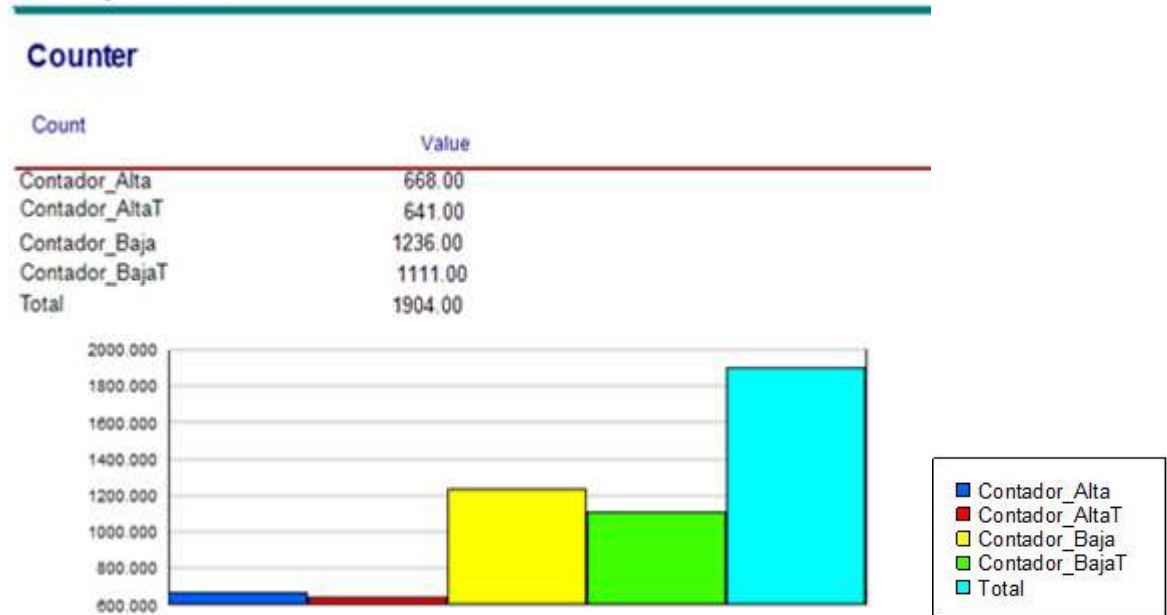
Fuente: Resultados del Estudio.

- **Uso específico**

En este reporte se muestran estadísticas sobre módulos específicos que se hayan programado, en este caso contadores (Counter) de calidad de caliza. (Ver Grafica 16).

Grafica 16. Estadísticas de uso específico en modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación.

User Specified



Fuente: Resultados del Estudio.

6.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza un análisis comparativo en los resultados obtenidos de los dos modelos simulados bajo las mismas condiciones operativas, luego se dará un énfasis al segundo modelo en el cual se utiliza una pala cargadora para los tres frentes de explotación, dicho modelo es el que requiere mayor atención, debido a que se acopla mejor a las necesidades de producción y disponibilidad del transporte en la mina.

Es de aclarar que el diseñador del modelo tendrá varios datos intrínsecos que no pueden ser programados en los modelos, es así como cada entidad tendrá un valor de 25 toneladas que es la capacidad de transporte de cada camión.

- En el modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación salen 3437 entidades del sistema, de las cuales 504 corresponden a Stock Redondo, 393 a Stock Calera, 389 a stock Calimina, 205 a Stock Playa y

1946 a Caliza Triturada. En el modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación salen 3438 entidades del sistema, de las cuales 833 corresponden a Stock Redondo, 477 a Stock Calera, 228 a Stock Calimina, 148 a Stock en Playa y 1752 a Caliza Triturada. Se evidencia una disminución de 194 entidades trituradas en el modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación, esto significa una disminución del 9.969%, es decir 4850 toneladas en el mes.

- Los tiempos de espera en cola para los modelos fueron: Modelo con una pala cargadora para cada frente.

Tabla 15. Tiempos de espera en cola para modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación.

Proceso	Tiempo Promedio (')	Tiempo Máximo (')
Carga camión calera	1.4551	16.1574
Carga camión Calimina	0.2134	6.8804
Carga camión Redondo	1.0507	32.1925
Descarga	0.7880	7.7301
Solicita camión Calera	72.2763	106.74
Solicita camión Calimina	76.7467	200.39
Solicita camión Redondo	95.3595	225.30
Trituración	6.2680	11.5334

Fuente: Resultados del Estudio.

Modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Tabla 16. Tiempos de espera en cola en modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación.

Proceso	Tiempo Promedio (')	Tiempo Máximo (')
Carga camión Calera	1.6937	15.6653
Carga camión Calimina	0.5216	7.7412
Carga camión Redondo	2.5669	19.1515
Descarga	0.4608	6.8510
Disponibilidad Calera	10.4166	18
Disponibilidad Calimina	10.9636	18
Disponibilidad Redondo	16.0441	18
Solicita camión Calera	62.5191	153.43
Solicita camión Calimina	8.2785	32.7127
Solicita camión Redondo	34.6498	356.07
Trituración	5.1990	11.5241

Fuente: Resultados del Estudio

En estos datos se evidencia un aumento en los tiempos de espera en cola para el segundo modelo, es decir el modelo en el cual hay disponibilidad de una pala para los tres frentes de explotación, la demora que más genero tiempo en cola en los dos modelos fue la solicitud de camiones para los frentes de explotación, debido en primer lugar a que el mineral seguía produciéndose, pero por la programación de los camiones para dirigirse a los frentes de explotación según la necesidad de mineral en la trituradora, no podían estar en los frentes de explotación siempre y en segundo lugar evidenciándose un déficit en el número de camiones con los que cuenta la cantera.

- En cuanto a los tiempos de espera *wait time*, estos no pueden ser usados para la comparación de la eficiencia en los dos modelos, debido a que los tiempos de espera, son el resultado de la suma del tiempo de espera que sufre la entidad en las colas y el tiempo simulado como desplazamientos por un módulo *delay*.
- En el modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación fueron extraídas 2306 entidades (57650 toneladas) de caliza de baja calidad, de las cuales salieron del sistema 2292 entidades (57300 toneladas) y 1153 entidades (28825 toneladas) de caliza de alta calidad, de las cuales 1145 entidades salieron del sistema (28625 toneladas), de igual forma ocurre en el modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación con respecto a la cantidad de entidades de caliza de alta y baja calidad que fueron extraídas, pero la cantidad de entidades que salió del sistema fue: caliza de baja calidad 2295 entidades (57375 toneladas) y caliza de alta calidad 1143 entidades (28575 toneladas).
- El tiempo de utilización de las palas en el modelo con una pala cargadora para cada frente de explotación fue: Pala Calera 0.3090 (30.9%), Pala Calimina 0.2355 (23.55%), Pala Redondo 0.2560 (25.60%), esto evidencia un elevado tiempo muerto del 69.1% para la Pala en Calera, 76.45% para la Pala en Calimina y 74.4% para la Pala en Redondo. En el modelo con una pala cargadora para los tres frentes de explotación, el tiempo de utilización de la pala en Calera fue 0.2707 (27.07%), en Calimina 0.2857 (28.57%) y en Redondo 0.1249 (12.49%) generando un tiempo muerto del 31.87%. Es por esto que se hace inviable la implementación del primer modelo, debido al alto costo que implicaría contratar a tres operadores de pala y teniendo en cuenta que el tiempo de inactividad es muy elevado.

- El tiempo de utilización de la trituradora en el primer modelo es de 0.9748 (97.48%) lo que deja un tiempo muerto del 2.52% y en el segundo modelo es de 0.8779 (87.79%) esto da un tiempo muerto del 12.21%.

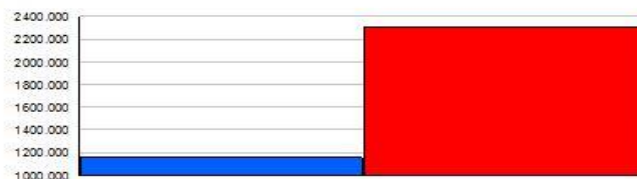
Analizando los resultados del segundo modelo, es decir el modelo en el cual se usa una pala cargadora para los tres frentes de explotación, por lo cual esta debe ser dirigida a cada uno de los frentes según la necesidad de mineral y la calidad de la mezcla que se necesita para ser triturada, tenemos que: (Ver Anexos I,J).

- De cada frente de explotación se extrajeron 1153 entidades es decir 28825 toneladas para un total de 86475 toneladas producidas en el mes de Marzo del año 2018.
- La Caliza de alta calidad producida fue de 1153 entidades (28825 toneladas), mientras que la caliza de baja calidad producida fue de 2306 entidades (57650 toneladas) para el mes de Marzo de 2018. (Ver Grafica 17).

Grafica 17. Entidades de tipo de caliza producidas.

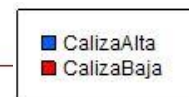
Other

Number In	Value
CalizaAlta	1153.00
CalizaBaja	2306.00



Number Out	Value
CalizaAlta	1143.00
CalizaBaja	2295.00

WIP	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
CalizaAlta	9.7253	0.260250974	0.00	14.0000
CalizaBaja	12.9250	0.692887203	0.00	21.0000

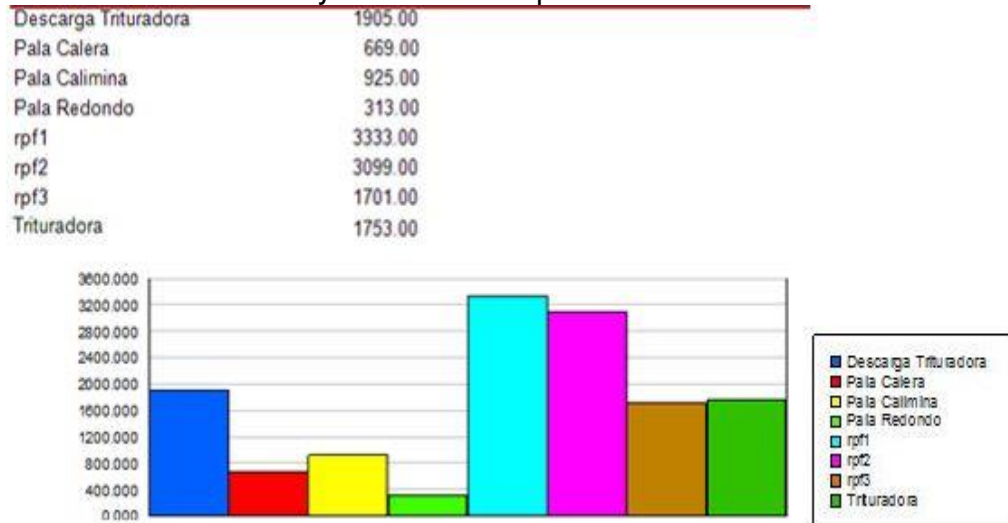


Fuente: Resultados del Estudio.

- Los procesos y el número de veces que fueron usados son: (Ver Grafica 18).
 - Descarga 1905 entidades (47625 toneladas) fueron descargadas.
 - Pala Calera: 669 entidades (16725 toneladas) fueron cargadas en el frente Calera.

- Pala Calimina: 925 entidades (23125 toneladas) fueron cargadas en el frente Calimina.
- Pala Redondo: 313 entidades (7825 toneladas) fueron cargadas en el frente Redondo.
- Trituradora: 1753 entidades (43825 toneladas) fueron trituradas.

Grafica 18. Procesos y utilización de procesos.



Fuente: Resultados del Estudio.

- Los stock de mineral generados fueron:
 - Stock Redondo: 833 entidades (20825 toneladas).
 - Stock Calera: 477 entidades (11925 toneladas).
 - Stock Calimina: 228 entidades (5700 toneladas).
 - Stock Playa: 148 entidades (3700 toneladas).

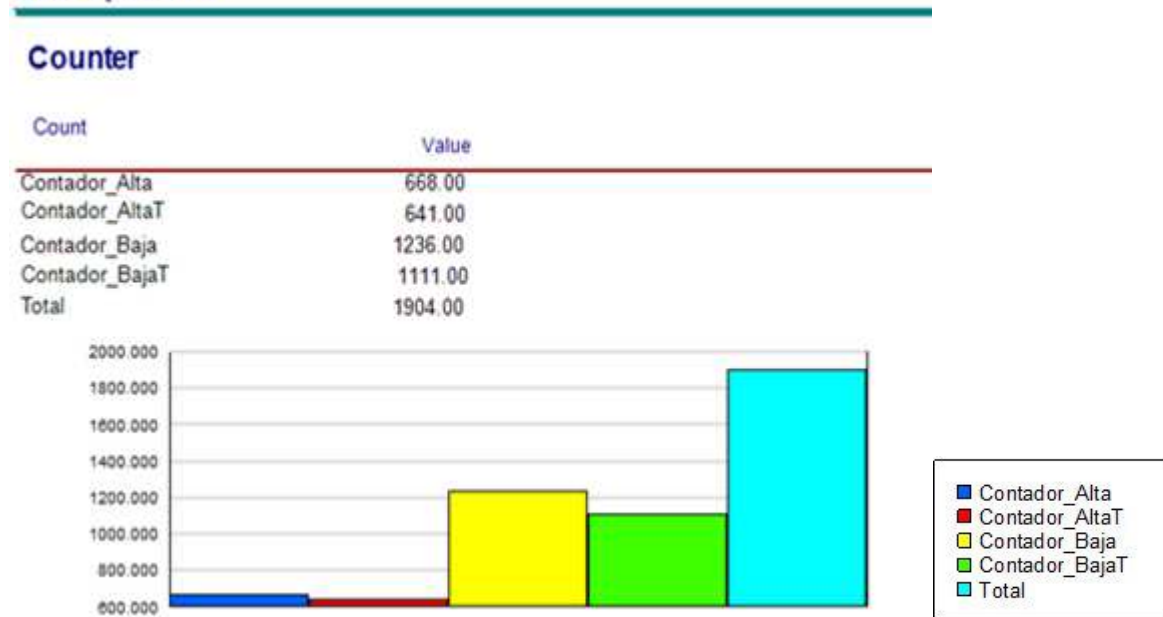
Evaluando la mezcla requerida para ser triturada, que debe ser del 35% de Caliza de Alta Calidad y 65% de Caliza de Baja Calidad tenemos: (Ver Grafica 19).

- Contador Alta Calidad: 668 entidades
- Contador Baja Calidad: 1236 entidades

Esto corresponde a un total de caliza descargada de 1904 entidades es decir 48100 toneladas, de las cuales 16700 toneladas corresponden a caliza de alta calidad y 30900 toneladas a caliza de baja calidad, verificando que en la mezcla hay un 34.719% de caliza de alta calidad y 65.281% de caliza de baja calidad, cumpliendo con la calidad de la mezcla requerida.

La caliza triturada fue 1752 entidades es decir a 43800 toneladas, de las cuales 641 entidades (16025 toneladas) son de caliza de alta calidad y 1111 entidades (27775 toneladas) son de caliza de baja calidad, correspondientes al 36.58% y 63.42% respectivamente.

Grafica 19. Contadores de Caliza de alta y baja calidad.
User Specified



Fuente: Resultados del Estudio.

- La producción mensual fue de 1752 entidades (43800 toneladas), esto significa que la producción diaria fue de 1825 toneladas día, que comparado con la producción esperada de 2000-2400 toneladas día y trabajando con el promedio de esta producción estimada, tenemos que la producción obtenida está por debajo de la esperada en un 17.04% diario y 17.04% acumulado a fin de mes.

7. CONCLUSIONES

La implementación de técnicas de simulación con el fin de representar sistemas del mundo real mediante modelos, variando sus propiedades y características nos permiten evaluarlas y optimizarlas, ahorrando tiempo y dinero sin necesidad de experimentar con el sistema real.

El modelo elegido para trabajar, es el modelo en el cual se usa una pala cargadora para los tres frentes de explotación, en el cual se presenta un 31.87% de tiempo muerto durante la simulación para la pala cargadora. Esto contrasta con el modelo en el cual se usa una pala cargadora para cada frente de explotación, en el cual se presenta un 69.1% de tiempo muerto para la pala en el frente Calera, 76.45% para la pala en frente Calimina y 74.4% para la pala en el frente Redondo.

Económicamente no es viable ni factible con las condiciones y recursos que tiene la empresa la implementación del primer modelo, debido a que por el bajo número de camiones que conforman la flota, el tiempo muerto de los operadores de las palas será demasiado.

La producción mensual máxima alcanzada con los recursos disponibles, una pala para cargar el mineral en los tres frentes de explotación y una flota de 5 camiones con capacidad máxima de 25 toneladas, es de 43800 toneladas, de las cuales 27775 son de Caliza de baja calidad y 16025 son de caliza de alta calidad.

La producción mensual máxima alcanzada para el mes de Marzo es de 43800 toneladas, la cual no satisface la producción máxima esperada por la empresa, que es de 52800, es decir está por debajo un 17.04%.

El porcentaje de calidad de la mezcla de caliza triturada necesaria es óptima, siendo trituradas 16025 toneladas de caliza de alta calidad y 27775 toneladas de caliza de baja calidad, que corresponden al 36.58% y 63.42% respectivamente, con un error del 4.5% para la caliza de alta calidad y 2.43% para la caliza de baja calidad.

La deficiencia en la producción esperada se debe a la baja disponibilidad de recursos en la flota de camiones en primer lugar y en segundo lugar a la disponibilidad de la pala cargadora, debido a que se pierde tiempo en el continuo desplazamiento entre los frentes de explotación que esta debe realizar para poder cumplir con la calidad de la mezcla de.

Aumentando la flota de camiones y usando el mismo modelo de una pala para los tres frentes de explotación, disminuye la cantidad de caliza triturada así: usando 6 camiones se alcanza una producción máxima de 41375 toneladas es decir 2425 toneladas menos y el stock en playa aumenta a 7050 toneladas es decir 3350 toneladas más, esto se debe a que se sobrepasa la capacidad del caudal de la trituradora.

Para la implementación del modelo con una pala cargadora en cada frente de explotación se requiere aumentar la capacidad de la flota de transporte, asignando una flota propia a cada frente de explotación, así como aumentar la capacidad de los equipos de trituración y demás equipos necesarios para los procesos siguientes, lo que implica una mayor inversión, que por las condiciones económicas y planes de expansión de la empresa no es necesaria ni viable económicamente.

Llevando el caudal de la trituradora hasta el 80% de su capacidad es decir a 320 t/h, la trituración de cada entidad, es decir de 25 toneladas tarda 4.69 minutos, pudiéndose aumentar la producción máxima hasta 47375 toneladas que corresponden a un 8.162% más.

8. RECOMENDACIONES

Comprar la licencia del software Rockwell Arena, esto que permitirá usarlo con mayor eficiencia y aprovechar al máximo su potencial.

Programar la explotación periódica de cada uno de los frentes, para así disminuir la cantidad de mineral en stock en cada frente de explotación.

Programar periódicamente la carga y transporte diario de cada tipo de mineral, es decir asignar horarios preestablecidos para que la pala este en cada frente de explotación y así mismo se tenga la disponibilidad de la flota de camiones, esto con el fin de evitar un mayor desgaste tanto a la pala como a los camiones.

Implementar técnicas de simulación en la industria minera, con el fin de representar sistemas del mundo real mediante modelos, variando sus propiedades y características, esto permitirá evaluarlas y optimizarlas.

Se recomienda a la Escuela de Ingeniería de Minas incluir dentro del plan de estudios, una materia en la cual se puedan formular, desarrollar, implementar y evaluar modelos de simulación.

BIBLIOGRAFIA

ARAZAG, Mohammad. DUNNA, Eduardo. Simulación y análisis de Modelos estocásticos. 1 ed. México, D.F. McGraw-Hill, 1998.288 p.

BAUDINO, Mario. GIL-COSTA, Verónica y otros. Modelos de simulación: Selección y reemplazo de equipos para proyectos mineros. Artículo Científico.: Universidad Nacional de San Luis. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales. Departamento de Minería, 2012. 5 p.

BESSO, Marcelo. Aplicación de software de Planificación minera a la Explotación de Piedra Caliza mediante Modulo de Perforación y Voladura. Trabajo de grado Ingeniero de Minas. Universidad Nacional de San Luis.: Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales. Departamento de Minería, 2015. 65 p.

COSS, Raúl. Simulación un enfoque práctico. Editorial Limusa Noriega Editores. México, 2003. 161 p.

FABREGAS, Aldo. WADNIPAR, Rodrigo. PATERNINA, Carlos. Simulación de sistemas productivos con Arena. Barranquilla: 2003. 209 p.

GIUBERGIA, Andrea. GIL-COSTA, Verónica y otros. Simulación aplicada al cálculo de capacidades de almacenamiento y stock piles. Artículo Científico.: Universidad Nacional de San Luis. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales. Departamento de Minería, 2016. 17 p.

GONZALEZ, Diana. Simulación de colas del sistema en caja, grupo BANCOLOMBIA. Trabajo de práctica empresarial.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Sistemas, 2008. 40 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas colombianas para la presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta Actualización. Bogotá D.C. ICONTEC, 2008. NTC 1486. 41p.

KELTON, David. SADOWSKI, Randall. STURROK, David. Simulación con software Arena. México D.F. McGraw-Hill: 2008. 62 p.

LOMBARDO, Luis. Simulación mediante Arena para resolver un problema de transporte en una zona portuaria. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2014. 114 p.

MEZA, Josué. Desarrollo de un modelo para la aplicación de simulación de un sistema de carguío y acarreo de desmonte en una operación minera a tajo abierto. Trabajo de grado Ingeniero de Minas. Lima.: Pontificia Universidad Católica del Perú. Departamento de Ingeniería. Sección de Ingeniería de Minas, 2011. 96 p.

ORTIZ, Oswaldo. CANCHARI, Godelia y otros. Simulación determinística y estocástica para dimensionar y seleccionar equipo y alternativas de minado en la explotación minera superficial.: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería Geológica, Metalúrgica y Geografía, 2007. 13 p.

ANEXOS

Anexo A. Descripción equipo de transporte en Cementos Avellaneda S.A.

Anexo B. Descripción de Palas Cargadoras en Cementos Avellaneda S.A.

Anexo C. Descripción de trituradora primaria en Cementos Avellaneda S.A.

Anexo D. Toma de tiempos en Cantera Redondo.

Anexo E. Toma de tiempos en Cantera Calera.

Anexo F. Tabulación de tiempos en Cantera Redondo.

Anexo G. Tabulación de tiempos en Cantera Calera.

Anexo H. Tabulación de tiempos en Cantera Calimina.

Anexo I. Producción diaria para Marzo de 2018.

Anexo J. Utilización de la pala para Marzo de 2018.

Anexo Q. Plano topográfico yacimiento Redondo

Anexo K. Plano topográfico yacimiento Caliminas

Anexo L. Plano topográfico yacimiento Calera

Anexo A. Descripción equipo de transporte en Cementos Avellaneda S.A.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS/ DESCRIPCIÓN
<p>2 Camiones Scania P310</p> 	<p>Motor: Scania DC9, 5 en línea, 310 hp. Largo: 6120 mm. Ancho: 2600 mm. Alto: 3067 mm. Peso: 6587 kg. Transmisión: 12 marchas sincronizada. Frenos: De tambor sistema APS. Capacidad de batea: 20m3</p>
<p>3 camiones Scania P340</p> 	<p>Fabricante: Scania Argentina. Empresa Matriz: Scania. Tipo: Tracto-camión. Motor: Scania DC 11 03, de 340 CV. Cilindros: 6 en línea. Turbo: Intercooler. Cilindrada: 10.7 l. Caja de velocidades: Scania GRS 900. Capacidad de batea: 20m3</p>


Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

Anexo B. Descripción de Palas Cargadoras en Cementos Avellaneda S.A.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS/DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="337 304 873 338">Cargador de ruedas Caterpillar 988</p> 	<p data-bbox="922 304 1463 436">Motor: Potencia neta 501 hp, Potencia Bruta 555 hp, modelo del motor Cat C18 Acert, Calibre 5.7", Carrera 7.2", Cilindrada 1104.5 pilg3.</p> <p data-bbox="922 436 1328 470">Cucharones: 6.4 m³ a 7.7 m³.</p> <p data-bbox="922 470 1463 667">Dimensiones: Longitud entre ejes 14.93 ft, Altura hasta el capo 10.35 ft, Espacio libre sobre el suelo 1.8 ft, Altura hasta la parte superior de la cabina 13.54 ft, Altura del pasador en C 3.31 ft, Profundidad de excavación 0.74 ft.</p> <p data-bbox="922 667 1398 701">Ejes: Subida y bajada máxima 22.4"</p>
<p data-bbox="402 709 808 743">Cargador Komatsu WA600</p> 	<p data-bbox="922 709 1235 743">Peso de trabajo: 52.9 t</p> <p data-bbox="922 743 1273 777">Fabr. Del motor: Komatsu</p> <p data-bbox="922 777 1289 810">Neum. Estándar: 35/65R33</p> <p data-bbox="922 810 1377 844">Modelo del motor: SAA6D170E-5</p> <p data-bbox="922 844 1354 877">Rendimiento del motor: 396 Kw</p> <p data-bbox="922 877 1279 911">Ancho de la pala: 5.225 m</p> <p data-bbox="922 911 1328 945">Capacidad de la pala: 6.4 m³.</p> <p data-bbox="922 945 1224 978">Tipo de dirección: KL.</p> <p data-bbox="922 978 1398 1012">Dimensión l x a x n: 12*3.54*4.46 m.</p>
<p data-bbox="315 1012 727 1045">Cargador Komatsu WA500.</p> 	<p data-bbox="922 1012 1463 1144">Motor: Modelo Komatsu SAA6D140E-5, Potencia (ISO 14396) 357 hp, N° de cilindros 6, Diámetro de carrera 140*165 mm, Cilindrada 15.24 l.</p> <p data-bbox="922 1144 1463 1247">Capacidad del cucharón: Capacidad 5.5 m³, Peso de descarga 1.8 t/m³, Peso de la cuchara 2660 kg.</p> <p data-bbox="922 1247 1463 1350">Frenos: De servicio hidráulico, De estacionamiento multidisco, De emergencia freno de estacionamiento.</p> <p data-bbox="922 1350 1463 1474">Sistema de dirección: Sistema Articulada, Tipo servodirección, Angulo de articulación 40°, Presión de trabajo 250 bar</p>

Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

Anexo C. Descripción de trituradora primaria en Cementos Avellaneda S.A.

EQUIPO	CARACTERÍSTICAS/DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="402 306 805 338">Trituradora de mandíbulas</p> 	<p data-bbox="922 405 1377 701">Ancho de la boca: 30" Caudal: 110 t/h. Largo de la boca: 42" Material a triturar: Caliza Tamaño max-min: 3.5-8" Modelo: TMPC 78106 Potencia: 110hp Producción max-min: 120-400 t/h Tamiz #: 1300</p>

Fuente: Cementos Avellaneda S.A.

Anexo D. Toma de tiempos en Cantera Redondo.

Cantera Redondo													
Turno	Carga				Transporte				Descarga				
	Posicionamiento del camión	Carga de Caliza	Espera a la pala	Total	Cantera a trituradora	Total	Trituradora a Cantera	Total	Espera	Posicionamiento	Descarga	Total	
	Seg	Seg	Seg	Min	Seg	Min	Seg	Min	Seg	Seg	Seg		
Miercoles 18 de Enero Turno de 8:00 a 17:00 horas													
Tarde	54	118	200	6,2	465	7,75	400	6,67			135	2,25	
	44	127	464	10,58	487	8,12	362	6,03			127	2,12	
	33	120	573	12,1	531	8,85	382	6,37			131	2,18	
Fin del turno 16:35 horas													
Lunes 6 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 horas													
Trade	46	151		3,28	802	13,37	393	6,55			35	114	2,48
	47	136		3,05	532	8,87	380	6,33			83	121	3,4
	48	221	82	5,85	517	8,62	405	6,75			33	116	2,48
Fin del turno 16:35 horas													
Martes 7 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 horas													
Mañana	39	132		2,85	570	9,50	480	8,00			70	124	3,23
	79	103		3,03	590	9,83	515	8,58			55	133	3,13
	30	105	51	3,1	625	10,42	600	10,00			41	130	2,85
	35	148	90	4,55	637	10,62	530	8,83			47	130	2,95
Tarde	58	104	395	9,28	540	9,00	515	8,58			45	130	2,92
	51	99		2,5	560	9,33	485	8,08			30	127	2,62
	40	140	130	5,17	500	8,33	432	7,20			31	97	2,13
Viernes 10 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 horas													
Mañana	66	125	250	7,35	851	14,18	720	12,00	391		50	100	9,02
	60	105	38	3,38	730	12,17	620	10,33			48	310	5,97
	70	110		3	680	11,33	595	9,92			75	112	3,12
Tarde	58	186		4,07	578	9,63	429	7,15	130		48	118	4,93
	33	90		2,05	600	10,00	450	7,50			40	130	2,83
	53	169	126	5,8	680	11,33	564	9,40			48	121	2,82
	45	116	105	4,43	696	11,60	587	9,78			51	136	3,12
Miercoles 22 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 Horas													
Mañana	70	121		3,18	519	8,65	384	6,40			68	114	3,03
	47	134		3,02	481	8,02	371	6,18			72	121	3,22
	50	130		3	480	8,00	386	6,43			69	130	3,32
Tarde	46	120		2,77	476	7,93	401	6,68			33	120	2,55
	43	103		2,43	475	7,92	371	6,18			36	115	2,52
	43	106		2,48	450	7,50	380	6,33			51	129	3
Fin del Turno 16:25													
Jueves 26 de Febrero Turno de 17:00 a 1:00													
	47	165		3,53	590	9,83	440	7,33			50	137	3,12
	47	248		4,92	585	9,75	470	7,83			47	207	4,23
	52	156	40	4,13	600	10,00	463	7,72			54	131	3,08
Lunes 2 de Marzo Turno de 8:00 a 17:00													
	60	128		3,13	441	7,35	319	5,32			39	129	2,8
	41	120	189	5,83	435	7,25	310	5,17			41	120	2,68

Fuente: Federico Balladore, estudiante UNSL.

Anexo E. Toma de tiempos en Cantera Calera.

Cantera Calera												
Turno	Carga				Transporte				Descarga			
	Posicionamiento del camión	Carga de Caliza	Espera a la pala	Total	Cantera a trituradora	Total	Trituradora a Cantera	Total	Espera	Posicionamiento	Descarga	Total
Miércoles 21 de Enero Turno 8:00 a 17:00 horas												
Mañana	41	89		2,17	701	11,68	531	8,85		41	111	2,53
	180	107		4,78	690	11,50	570	9,5		30	115	2,42
	28	106		2,23	705	11,75	560	9,33		43	90	2,22
Fin del turno												
Miércoles 5 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 horas												
Mañana	55	185		4,00	884	14,73	588	9,8		46	260	5,10
	111	158	30	4,98	780	13,00	742	12,4		44	160	3,40
Tarde	78	188		4,43	860	14,33	514	8,57		40	145	3,08
	60	145		3,42	695	11,58	493	8,22		52	130	3,03
	62	138		3,33	665	11,08	540	9		56	190	4,10
	52	128		3,00	738	12,30	501	8,35		57	180	3,95
Se termino el turno 16:30 horas												
Lunes 9 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 horas												
Mañana	60	98	150	5,13	698	11,63	515	8,58		51	130	3,02
	60	102	259	7,02	773	12,88	531	8,85		38	180	3,63
	50	112	80	4,03	673	11,22	540	9,00		58	185	4,05
	75	95		2,83	781	13,02	781	13,02		45	156	3,35
	56	84	93	3,88	660	11,00	570	9,50		49	153	3,37
	72	99		2,85	677	11,28	488	8,13		36	171	3,45
Fin del Turno 12:51 horas												
Miércoles 11 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 Horas												
Mañana	48	128		2,93	733	12,22	578	9,63		40	121	2,68
Tarde	70	103	385	9,30	708	11,80	635	10,6		31	122	2,55
	90	120	195	6,75	720	12,00	620	10,3		22	105	2,12
	42	105	532	11,32	705	11,75	600	10		30	115	2,42
Jueves 12 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 Horas												
Tarde	52	121	150	5,38	745	12,42	601	10,02		52	120	2,87
	92	135	279	8,43	730	12,17	653	10,88		58	127	3,08
	59	95	75	3,82	740	12,33	630	10,50		80	110	3,17
	54	136	125	5,25	799	13,32	647	10,78		75	130	3,42
Viernes 20 de Febrero Turno de 8:00 a 17:00 Horas												
Mañana	51	200	30	4,68	715	11,92	591	9,85		51	135	3,10
	62	230		4,87	785	13,08	590	9,83		26	134	2,67
	36	256	66	5,97	787	13,12	600	10,00		30	139	2,82
	30	233	105	6,13	662	11,03	596	9,93		21	142	2,72

Fuente: Federico Balladore, estudiante UNSL

Anexo F. Tabulación de tiempos en Cantera Redondo.

Redondo			
Carga	Redondo-Trituradora	Trituradora-Redondo	Descarga
Minutos	Minutos	Minutos	Minutos
6,20	7,75	6,67	2,25
10,58	8,12	6,03	2,12
12,10	8,85	6,37	2,18
3,28	13,37	6,55	2,48
3,05	8,87	6,33	3,40
5,85	8,62	6,75	2,48
2,85	9,50	8,00	3,23
3,03	9,83	8,58	3,13
3,10	10,42	10,00	2,85
4,55	10,62	8,83	2,95
9,28	9,00	8,58	2,92
2,50	9,33	8,08	2,62
5,17	8,33	7,20	2,13
7,35	14,18	12,00	9,02
3,38	12,17	10,33	5,97
3,00	11,33	9,92	3,12
4,07	9,63	7,15	4,93
2,05	10,00	7,50	2,83
5,80	11,33	9,40	2,82
4,43	11,60	9,78	3,12
3,18	8,65	6,40	3,03
3,02	8,02	6,18	3,22
3,00	8,00	6,43	3,32
2,77	7,93	6,68	2,55
2,43	7,92	6,18	2,52
2,48	7,50	6,33	3,00
3,53	9,83	7,33	3,12
4,92	9,75	7,83	4,23
4,13	10,00	7,72	3,08
3,13	7,35	5,32	2,80
5,83	7,25	5,17	2,68

Fuente: Datos de Estudio.

Anexo G. Tabulación de tiempos en Cantera Calera.

Calera			
Carga	Calera-Trituradora	Trituradora-Calera	Descarga
Minutos	Minutos	Minutos	Minutos
2,17	11,68	8,85	2,53
4,78	11,50	9,50	2,42
2,23	11,75	9,33	2,22
4,00	14,73	9,80	5,10
4,98	13,00	12,37	3,40
4,43	14,33	8,57	3,08
3,42	11,58	8,22	3,03
3,33	11,08	9,00	4,10
3,00	12,30	8,35	3,95
5,13	11,63	8,58	3,02
7,02	12,88	8,85	3,63
4,03	11,22	9,00	4,05
2,83	13,02	13,02	3,35
3,88	11,00	9,50	3,37
2,85	11,28	8,13	3,45
2,93	12,22	9,63	2,68
9,30	11,80	10,58	2,55
6,75	12,00	10,33	2,12
11,32	11,75	10,00	2,42
5,38	12,42	10,02	2,87
8,43	12,17	10,88	3,08
3,82	12,33	10,50	3,17
5,25	13,32	10,78	3,42
4,68	11,92	9,85	3,10
4,87	13,08	9,83	2,67
5,97	13,12	10,00	2,82
6,13	11,03	9,93	2,72
2,95	13,42	11,17	2,60
7,40	13,58	13,13	2,63
3,57	12,10	11,75	3,22
3,47	12,58	10,67	3,27
3,13	14,00	11,67	4,17
3,73	14,10	11,35	3,40
3,12	13,83	10,88	2,63
3,75	16,30	14,35	3,55
4,13	18,25	14,00	3,82

Fuente: Datos de Estudio.

Anexo H. Tabulación de tiempos en Cantera Calimina.

Calimina			
Carga	Calimina-Trituradora	Trituradora-Calimina	Descarga
Minutos	Minutos	Minutos	Minutos
3,21	7,05	5,15	4,11
4,98	7,5	6,12	3,23
3,27	8,12	5,19	4,33
2,96	6,29	5,77	2,28
5,17	6,97	5,48	2,67
2,65	7,23	5,81	2,99
2,83	7,67	6,1	2,67
3,45	7,45	4,95	2,34
3,5	6,92	5,74	3,12
2,9	8,21	5,34	3,45
4,18	8,34	4,78	2,87
5,14	6,17	5,55	2,93
3,28	6,55	5,47	3,6
2,7	6,44	5,88	3,43
3,55	6,78	6,12	4,1
4,12	6,09	5,56	3,95
4,11	7,34	5,32	3,65
3,87	7,91	7,34	2,45
3,15	7,85	5,22	2,05
2,68	8,45	4,9	2,56
4,05	8,9	5,67	2,66
3,34	9,12	5,87	2,9
3,77	6,81	5,65	3,5
2,66	7,58	6,42	3,34
4,18	7,16	5,33	2,8

Fuente: Datos de Estudio.

Anexo I. Producción diaria para Marzo de 2018.

PRODUCCION Marzo 2018				
Fecha	E. Acumuladas	T. Acumuladas	E. Dia	T. Dia
01/03/2018	68	1700	68	1700
02/03/2018	135	3375	67	1675
03/03/2018	205	5125	70	1750
05/03/2018	271	6775	66	1650
06/03/2018	346	8650	75	1875
07/03/2018	419	10475	73	1825
08/03/2018	492	12300	73	1825
09/03/2018	570	14250	78	1950
10/03/2018	643	16075	73	1825
12/03/2018	722	18050	79	1975
13/03/2018	796	19900	74	1850
14/03/2018	863	21575	67	1675
15/03/2018	940	23500	77	1925
16/03/2018	1007	25175	67	1675
17/03/2018	1084	27100	77	1925
19/03/2018	1151	28775	67	1675
20/03/2018	1220	30500	69	1725
21/03/2018	1293	32325	73	1825
22/03/2018	1372	34300	79	1975
23/03/2018	1449	36225	77	1925
26/03/2018	1526	38150	77	1925
27/03/2018	1598	39950	72	1800
28/03/2018	1674	41850	76	1900
31/03/2018	1752	43800	78	1950
Promedio			73	1825

Fuente: Resultados del estudio.

Anexo J. Utilización de la pala para Marzo de 2018

Utilización de la Pala			
Fecha	F. Calera	F. Calimina	F. Redondo
01/03/2018	30	37	14
02/03/2018	25	46	0
03/03/2018	25	50	0
05/03/2018	27	44	0
06/03/2018	27	34	24
07/03/2018	30	48	2
08/03/2018	26	40	12
09/03/2018	31	39	16
10/03/2018	28	39	13
12/03/2018	29	34	23
13/03/2018	26	51	0
14/03/2018	25	34	4
15/03/2018	31	29	24
16/03/2018	27	44	1
17/03/2018	30	43	14
19/03/2018	25	49	0
20/03/2018	26	7	39
21/03/2018	28	38	14
22/03/2018	28	29	27
23/03/2018	31	40	13
26/03/2018	29	40	13
27/03/2018	26	52	1
28/03/2018	29	23	28
31/03/2018	30	35	21

Fuente: Resultados del estudio.