



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**“EVALUACIÓN DE FLOTA DE CAMIONES ALJIBES Y PUNTOS DE LLENADO
Y SUS ALTERNATIVAS EN UNA MINA A CIELO ABIERTO CON SOFTWARE
ARENA”**

POR

SUSANA MACARENA VALENZUELA MOLINA

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil de Minas

Profesor Guía
Asieh Hekmat

Agosto 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Susana Macarena Valenzuela Molina

© 2024 Susana Macarena Valenzuela Molina

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

AGRADECIMIENTOS

Tengo la fortuna de siempre haberme sentido acompañada en este camino, de siempre haber recibido una palabra de apoyo o motivación, un abrazo, un consejo. Siempre hubo alguien que me hizo ver que todo tiene solución, que todo tiene un lado bueno. Agradezco a aquellos que de alguna u otra forma formaron parte de esta etapa.

Agradecer a la profesora Asieh Hekmat por su apoyo y comprensión durante este trabajo y por recordarme que cada uno elige su camino, su orden y sus tiempos y que eso está bien.

A mis padres Remigio Valenzuela y Susana Molina por estar desde siempre y en cada uno de los momentos más importantes de mi vida, por su apoyo incondicional en cada una de mis atapas y vivencias, por su comprensión, por sus consejos y su amor.

A mis hermanas Camila y Francisca por su compañía y apoyo cada vez que lo necesitaba, por los planes de “estudio” en conjunto que terminaban en conversaciones y juegos y por las miles de risas.

A mi esposo Emilio, por el apoyo incondicional, por su esfuerzo y por su amor. Sin duda lo mejor de haber entrado a estudiar esta carrera fue conocerte a ti.

Y por último a los pequeños que se han convertido en mi motor y mi motivación de cada día, los que me hacen reír a diario y que me hacen sentir orgullosa con cada pequeño logro, mis hijos Benjamín y Josefina, porque aún sin ellos saberlo, me lo han dado todo.

RESUMEN

La industria minera involucra actividades como el carguío, el transporte, la perforación y la tronadura que implican movimiento de material constante. Esto hace inevitable que se genere suspensión de material particulado, el cual puede generar impactos en los seres humanos, animales, vegetación, equipos y comunidades cercanas. Es por esto, que tener un adecuado sistema de control de polvo es muy importante en cualquier actividad minera.

Un punto de generación de material particulado importante son los caminos. Para mantener estos humectados es necesario tener una flota de camiones regadores que den abasto según las propias características de la mina en estudio.

En este trabajo se estudia la flota de camiones aljibes óptima para un caso particular. Este comienza con el análisis de una flota de 4 camiones aljibes de 49,000 L de capacidad y con tres puntos de llenado ubicados en distintas zonas de la mina con el fin de determinar si esta cumple con lo necesario para tener un buen control del polvo. Luego se evalúan las flotas alternativas con 5, 6 y 7 camiones y la opción de aumentar en un punto de llenado el sector 2 o el sector 3.

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el software de simulación Arena, el cual permite desarrollar un modelo que logra representar la situación real en estudio mediante módulos y el ingreso de datos. Los resultados muestran que la situación original de 4 camiones no da abasto y que el tiempo entre un riego y otro puede alcanzar los 120 minutos en algunos sectores, lo que sobrepasa los 102 minutos correspondiente al tiempo máximo entre riegos con temperatura mínima. El análisis de los otros cinco escenarios muestra un aumento en la frecuencia de regado, sin embargo, el caso que más se ajusta a los parámetros impuestos es aquel cuya flota está compuesta por 6 camiones y un punto de llenado más en el sector 3, ya que este permite un riego similar en cada ruta y bajos tiempos de espera en los puntos de llenado.

Si bien los resultados indican que para un mejor control del polvo es necesario aumentar la cantidad de camiones regadores, hay factores que por las limitaciones del trabajo no se han considerado y que es recomendable que se tomen en cuenta antes de tomar una decisión. Dentro de estos se encuentran los aspectos económicos como la inversión necesaria para aumentar la flota, gastos operacionales, las emisiones, gasto de agua y la utilización de otro tipo de supresores.

ABSTRACT

The mining industry involves activities such as loading, hauling, drilling and blasting that involves constant movement of material. This inevitable leads to the generation of suspended particulate matter, which can generate impacts on humans, animals, vegetation, equipment and nearby communities. This is why having an adequate dust control system is very important in any mining activity.

An important point of generation of particulate material is the roads. In order to maintain a certain humidity on the road it is necessary to have a fleet of water trucks that can supply according to the characteristics of the mine under study.

This work studies the optimal fleet of water trucks for a particular case. It begins with the analysis of a fleet of 4 water trucks of 49,000 L capacity and with three filling points located in different areas of the mine to determine if it meets the necessary to have appropriate dust control. Then alternative fleets are evaluated with 5, 6 and 7 trucks and the option of increasing by one filling point in sector 2 or sector 3.

To carry out this work, the simulation software Arena is used, allowing the development of a model that represents the real situation under study through modules and data entry. The results show that the original situation of 4 trucks is not sufficient and that the time between irrigations can reach 120 minutes in some sectors which exceeds the 102 minutes corresponding to the maximum time between irrigations with minimum temperature. The analysis of the other five cases shows an increase in watering frequency, however, the case that best fits the imposed parameters is the one whose fleet is composed of 6 trucks and one more filling point in sector 3, as this allows for similar watering on each route and low waiting times at the filling point.

Although the results indicate that for better dust control it is necessary to increase the number of water trucks, there are factors that, due to the limitations of the work, have not been considered and that it is advisable to take into account before making a decision. Among these are the economic aspects such as the investment needed to increase the fleet, operational cost, emissions, water consumption and the use of other types of suppressants.

INDICE

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1 | Objetivos | 1 |
| 1.1.1 | Objetivo General | 1 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos..... | 1 |
| 1.2 | Hipótesis de Trabajo..... | 2 |
| 1.3 | Alcances..... | 2 |
| 1.4 | Metodología | 2 |
| 2 | ANTECEDENTES..... | 4 |
| 2.1 | Contaminante..... | 4 |
| 2.1.1 | Tipo de Contaminante..... | 4 |
| 2.1.2 | Causas de la generación de polvo | 5 |
| 2.1.3 | Consecuencias de la presencia de material particulado o polvo | 6 |
| 2.1.4 | Supresores y equipos para la supresión de polvo..... | 7 |
| 2.2 | Camiones Regadores..... | 10 |
| 2.2.1 | Descripción del Sistema | 12 |
| 2.2.2 | Rendimiento | 16 |
| 2.3 | Puntos de llenado..... | 16 |
| 2.3.1 | Estructura y Funcionamiento | 17 |
| 2.4 | Mina A | 18 |
| 2.4.1 | Sistema de regadío actual | 18 |
| 2.5 | Simulación | 20 |
| 2.5.1 | Simulación en minería..... | 21 |
| 2.5.2 | Arena | 21 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3 | DESARROLLO EXPERIMENTAL | 24 |
| 3.1 | Datos a utilizar | 24 |
| 3.2 | Delimitación del mapa. | 26 |
| 3.3 | Cálculo de tiempo entre riegos | 28 |
| 3.4 | Funcionamiento Software Arena | 30 |
| 3.5 | Desarrollo Simulación | 31 |
| 3.5.1 | Simulación Camión MTT13..... | 32 |
| 3.6 | Escenarios de Simulación | 38 |
| 3.6.1 | Simulación 4 camiones modelo MTT13 | 38 |
| 3.6.2 | Simulación 5 camiones modelo MTT13 | 40 |
| 3.6.3 | Simulación 6 camiones modelo MTT13 | 42 |
| 3.6.4 | Simulación 7 camiones modelo MTT13 | 44 |
| 3.6.5 | Simulación con punto de llenado extra | 45 |
| 4 | RESULTADOS | 49 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 54 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA..... | 56 |
| 7 | ANEXOS | 58 |
| 7.1 | ANEXO A: Precursores para la formación de contaminantes secundarios..... | 58 |
| 7.2 | ANEXO B: Bomba de agua | 59 |
| 7.3 | ANEXO C: Sistema de rociado | 60 |
| 7.4 | ANEXO D: Dimensiones tubería vertical | 62 |
| 7.5 | ANEXO E: Curvas de velocidades para camión aljibe..... | 63 |
| 7.6 | ANEXO F: Módulos y variables software Arena | 64 |
| 7.7 | ANEXO G: Ingreso de datos del modelo de simulación | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1. Valores dimensiones camiones y estanques MTT13 [14]. | 12 |
| Tabla 2.2. Módulos software ARENA [19]. | 22 |
| Tabla 3.1 Características camiones aljibes. Elaboración propia. | 24 |
| Tabla 3.2. Capa de agua y distancia de regado según velocidad de avance. Elaboración propia. | 25 |
| Tabla 3.3. Velocidad máxima en determinada pendiente. | 26 |
| Tabla 3.4. Rutas y longitudes correspondientes. Elaboración propia..... | 27 |
| Tabla 3.5. Tabla de datos distribución triangular para procesos de regado..... | 28 |
| Tabla 3.6. Tiempo entre riegos para cada ruta a 11 °C y 24 °C..... | 29 |
| Tabla 3.7. Sectores delimitados para la simulación. | 31 |
| Tabla 3.8. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio de riego por camino. Caso 4 aljibes..... | 38 |
| Tabla 3.9. Utilización puntos de llenado y tiempos de espera. Caso 4 aljibes. | 39 |
| Tabla 3.10. Tiempo de viajes del camión aljibe a puntos de llenado y distintas rutas Caso 4 aljibes. | 39 |
| Tabla 3.11. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio de riego por ruta. Caso 5 aljibes. | 40 |
| Tabla 3.12. Utilización puntos de llenado y tiempos de espera. Caso 5 aljibes. | 41 |
| Tabla 3.13. Tiempo de viajes del camión aljibe a puntos de llenado y distintas rutas. Caso 5 aljibes. | 41 |
| Tabla 3.14. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio entre riegos por ruta. Caso 6 aljibes..... | 42 |
| Tabla 3.15. Utilización puntos de llenado y tiempos de espera. Caso 6 aljibes. | 43 |
| Tabla 3.16. Tiempo de viajes del camión aljibe a puntos de llenado y distintas rutas. Caso 6 aljibes. | 43 |
| Tabla 3.17. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio entre riego por ruta. Caso 7 aljibes..... | 44 |
| Tabla 3.18. Utilización puntos de llenado y tiempo de espera. Caso 7 aljibes. | 45 |
| Tabla 3.19. Tiempo de viaje del camión aljibe a puntos de llenado. Caso 7 aljibes. | 45 |

| | |
|--|----|
| Tabla 3.20. Comparativa del número de regados y llenados en el sector dos con uno y dos puntos de llenado..... | 46 |
| Tabla 3.21. Comparativa tiempos de viaje del camión con uno y dos puntos de llenado. | 47 |
| Tabla 3.22. Comparativa de número de regados y llenados en el sector 3 con uno y dos puntos de llenado..... | 47 |
| Tabla 3.23. Comparativa tiempos de viaje del camión con uno y dos llenados. | 48 |
| Tabla 7.1. Contaminantes primarios y secundarios..... | 58 |
| Tabla 7.2. Rendimiento estándar del vehículo [13]. | 60 |
| Tabla 7.3. Riego de precisión para tanque de 49210 litros con abertura de 3/8" [13]. | 61 |
| Tabla 7.4 Riego de precisión para tanque de 75708 litros con abertura de 3/8" [13]. | 61 |
| Tabla 7.5. Dimensiones tuberías verticales [16]. | 62 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Orden grafico de la metodología del trabajo..... | 3 |
| Figura 2.1. Fuentes de contaminantes atmosféricos..... | 4 |
| Figura 2.2. Dimensiones camión aljibe [14]. | 11 |
| Figura 2.3. Dimensiones estanque camión aljibe [14]. | 11 |
| Figura 2.4. Vista posterior camión aljibe [13]. | 13 |
| Figura 2.5. Vista lateral camión aljibe [13]...... | 13 |
| Figura 2.6. Ejemplo de patrón y alcance de rociado [13]. | 16 |
| Figura 2.7. Punto de llenado con manguera [16]...... | 17 |
| Figura 2.8. Punto de llenado mediante tubería vertical. [17]..... | 17 |
| Figura 2.9. Ubicación de los puntos de agua. El punto rojo es aquel al que no se tiene acceso directo y los amarillos a los que sí. | 19 |
| Figura 2.10. Procedimiento de regadío para temperaturas menores a 5 °C. | 20 |
| Figura 2.11. Procedimiento de regadío para temperaturas mayores a 5°C. | 20 |
| Figura 3.1. Mapa con rutas definidas..... | 27 |
| Figura 3.2. Funcionamiento simulación. | 30 |
| Figura 3.3. Entrada de camiones y elección de sector..... | 32 |
| Figura 3.4. Selección de ruta. | 33 |
| Figura 3.5. Toma de decisión para seguir regando. | 34 |
| Figura 3.6. Elección en punto de intersección. | 36 |
| Figura 3.7. Desarrollo proceso de llenado camión aljibe..... | 37 |
| Figura 4.1. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 1 para cada escenario. | 49 |
| Figura 4.2. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 2 para cada escenario. | 50 |
| Figura 4.3. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 3 para cada escenario. | 51 |
| Figura 4.4. Gráfico tiempos entre riegos del sector 2 versus la cantidad de puntos de llenado. | 52 |
| Figura 4.5. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 3 versus cantidad de puntos de llenado. | 52 |
| Figura 4.6. Gráfico gasto de agua en los distintos escenarios de simulación. | 53 |
| Figura 7.1. Partes de la bomba de agua [13]. | 59 |
| Figura 7.2. Largo y ancho de riego según número de rociadores y abertura de estos [13]. | 60 |
| Figura 7.3. Dimensiones tuberías verticales [16]...... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 7.4. Curva de velocidad subida camión CAT [22]. | 63 |
| Figura 7.5. Curva de velocidad bajada camión CAT [22]. | 64 |
| Figura 7.6. Ventana de edición entidad. | 65 |
| Figura 7.7. Variables utilizadas en la simulación sección 1. | 65 |
| Figura 7.8. Variables utilizadas en la simulación sector 2. | 66 |
| Figura 7.9. Variables utilizadas en la simulación sector 3. | 66 |
| Figura 7.10. Recursos asociados al sector 1. | 67 |
| Figura 7.11. Recursos asociados al sector 2. | 67 |
| Figura 7.12. Recursos asociados al sector 3. | 67 |
| Figura 7.13. Cadena de módulos para el funcionamiento de la ruta. | 67 |
| Figura 7.14. Definición de la variable para número de camiones. | 68 |
| Figura 7.15. Ventana de edición proceso de rutas. | 68 |
| Figura 7.16. Ventana de edición recursos. | 69 |
| Figura 7.17. Ventana de edición tiempo en ruta. | 69 |
| Figura 7.18. Ventana de edición para decisión en base a cantidad de agua. | 70 |
| Figura 7.19. Ventana de edición para decisión en base a cantidad de camiones que han ingresado a ruta. | 70 |
| Figura 7.20. Ventada de edición Route. | 71 |

1 INTRODUCCIÓN

El polvo o material particulado es considerado un gran problema en distintas industrias, siendo la minera una de ellas. La gran cantidad de material en suspensión que se genera debido a la actividad minera trae consigo consecuencias que afectan de diferentes maneras a operarios, equipos, comunidades cercanas y también al rendimiento y eficiencia de la operación [1]. Es por lo que localizar los puntos de mayor generación de material en suspensión y tomar acciones adecuadas en estos sectores es de suma importancia para evitar los problemas anteriores y darle una buena utilización al recurso del agua.

Actualmente existen distintas metodologías y tecnologías para suprimir este problema como los nebulizadores, aspersores y camiones aljibe que, junto con sustancias como el agua y la bischofita, pueden controlar el polvo a distintos niveles y por distintos tiempos.

En este trabajo se simula con el programa ARENA la distribución de la flota de camiones aljibe y la ubicación de los puntos de llenado de los camiones de manera de no obstruir el trabajo de una mina a cielo abierto y cumplir con las necesidades de esta.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es analizar y determinar alternativas a la flota de camiones aljibe actual y sus puntos de llenado en una mina a cielo abierto mediante la simulación con el software ARENA para lograr un adecuado regado y control del polvo en los distintos caminos de esta.

1.1.2 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos a cumplir durante la realización de este trabajo, encontramos:

- Calcular velocidades, tiempos y definir rutas para los distintos camiones aljibe en la operación.
- Generar un modelo de simulación que replique la situación actual de la mina y que permita la evaluación de nuevos casos.

- Determinar tiempos de regado y número de veces que se riega cada ruta.
- Determinar la presencia de colas y tiempos de espera en puntos de llenado.
- Lograr comparar el caso inicial con los distintos escenarios simulados y notar como los aspectos relevantes del regado varían de uno a otro.

1.2 Hipótesis de Trabajo

La flota de camiones regadores y puntos de llenado actual de la mina no cumplen en su totalidad el objetivo impuesto, por lo que es necesario determinar una nueva flota o nuevos puntos de llenado para satisfacer la necesidad de controlar el polvo en los caminos de la mina.

1.3 Alcances

Debido a que la información que se tiene es limitada, es necesario establecer los alcances y limitaciones que tiene este trabajo, de manera de obtener una clara visión de bajo qué situación se trabaja y se validan los objetivos o suposiciones realizadas.

Se trabaja con información únicamente de los meses de septiembre a marzo, omitiendo aquellos meses donde se presenta mayor número de precipitaciones o nieva, por lo que no se considera estos últimos casos en los análisis a lo largo del trabajo. Además, se considera una temperatura promedio máxima y mínima, obtenidas de las temperaturas mensuales en los últimos 12 años en la zona [2].

Se define las rutas que serán evaluadas dentro de los caminos de la mina considerando factores como alcance del camión y capacidad entre otros, sin embargo, estas rutas podrían tener otra configuración si se quisiera. Además, no se considera una diferencia entre rutas por tráfico de otros equipos, o sea, todas las rutas tienen el mismo uso.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se utilizan los datos de una mina a cielo abierto, a la que llamaremos mina A, la cual posee una flota de 4 camiones aljibe y 3 puntos de llenado en la actualidad. En base a esto y considerando lo planteado anteriormente en los objetivos e introducción, se plantea la metodología para este trabajo.

Se evalúa y analiza el problema inicial, teniendo como base la información recolectada, para luego tratar estos y obtener los datos de entrada a la simulación. Luego se presentan diferentes escenarios en cuanto a número de camiones aljibes y punto de llenados y se comienza la simulación de acuerdo con estos. De forma posterior, los resultados obtenidos son analizados y comparados con la información inicial.

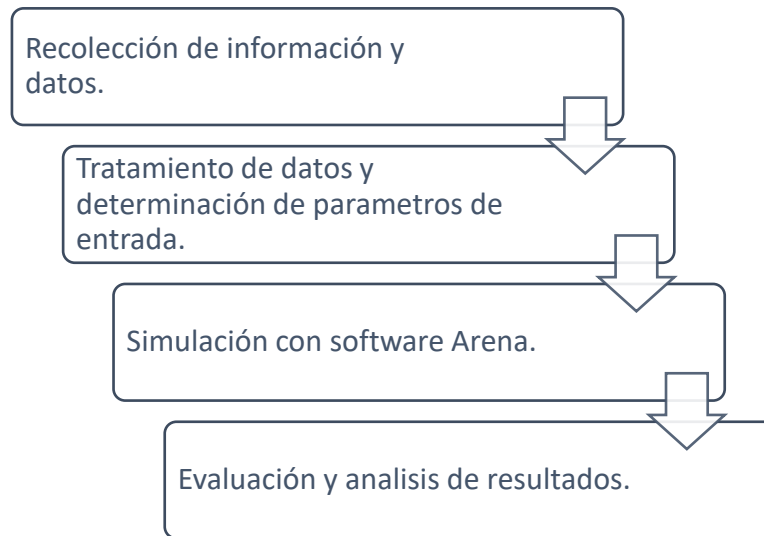


Figura 1.1. Orden grafico de la metodología del trabajo.

2 ANTECEDENTES

2.1 Contaminante

En la industria minera existen variados tipos de contaminantes que afectan en distintos ámbitos. Uno de estos es el polvo o material particulado, el cual siempre está presente y se convierte en un gran inconveniente cuando no es controlado, ya que sus consecuencias no apuntan en una sola dirección.

2.1.1 Tipo de Contaminante

Un contaminante es originado de forma natural o por la acción del hombre, dependiendo de esto las fuentes de los contaminantes se consideran como biogénicas o antropogénicas respectivamente. Además, dentro de las fuentes antropogénicas se diferencian entre fuentes móviles, estacionarias o fugitivas (figura 2.1). Estas últimas comprenden emisiones que no son canalizadas por ductos, chimeneas u otros sistemas hacia el exterior, tales como aquellas provenientes del tránsito de vehículos por calles sin pavimentar, de la construcción, de las demoliciones, entre otras [3]. Bajo esta definición se tiene que el polvo proviene de una fuente antropogénica del tipo fugitiva, pues es producido en su mayoría por la acción de equipos pesados como camiones y palas, entre otras causas, sin ser capaz de ser canalizado.

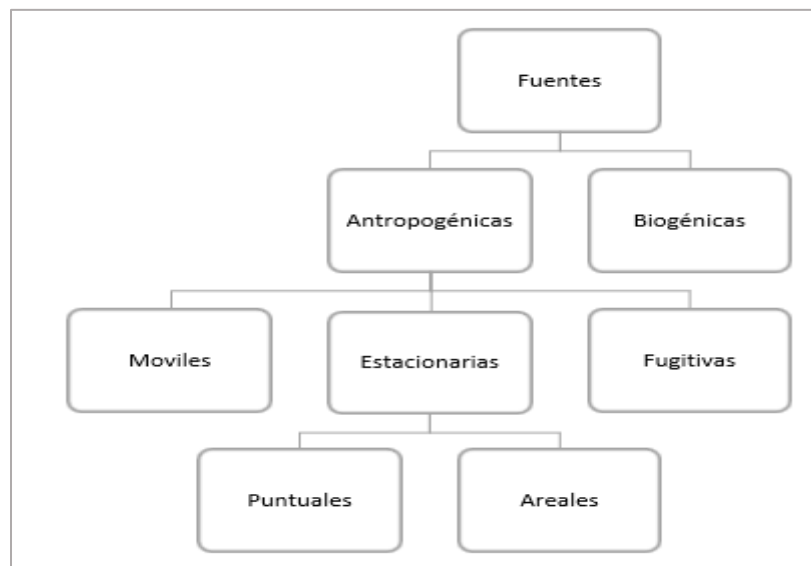


Figura 2.1. Fuentes de contaminantes atmosféricos.

Además, los contaminantes se clasifican en dos tipos: contaminantes primarios y contaminantes secundarios. Los primeros se definen como aquellos que se emiten de forma directa a la atmósfera por diversas fuentes [4] como lo son el humo de los tubos de escape, el polvo de las calles, gases emitidos por las fábricas, entre otros. Mientras que los segundos como aquellos que no son emitidos directamente, si no, que se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas a partir de la presencia de materiales gaseosos, llamados precursores [5]. Para más información, revisar ANEXO A.

2.1.2 Causas de la generación de polvo

Se conoce como polvo al material sólido fino que puede mantenerse en suspensión por cierto tiempo en el ambiente. Estos pueden tener diferentes composiciones dependiendo de su fuente y diferentes tamaños dependiendo de su fragmentación.

Se encuentra en todas partes, sin embargo, hay ciertas actividades que estimulan la generación de este y que expone de mayor manera a las personas que participan de estas. Así, diversos sectores se ven afectados por este como: minería, construcción, agricultura, entre otros.

En minería la generación de polvo no se centra en una sola actividad, si no que muchas acciones pueden provocar la presencia de este contaminante. Se tiene que, en general, cerca del 65% del polvo proviene del acarreo de material y transporte sobre camiones mineros, el 30% de fuentes fijas como pilas de acopio y el otro 5% proviene de factores del entorno natural y climático como el viento [6].

Se pueden especificar algunos puntos o sectores de mayor generación de polvo en minería como son taludes, chancadores, laderas, correas transportadoras, tronaduras, perforadoras, caminos industriales, segregados y de producción [7], los sectores de carga de camiones, así como también actividades de mantención de caminos, entre otros.

2.1.3 Consecuencias de la presencia de material particulado o polvo

El polvo en minería, así como en otras prácticas, tiene una serie de consecuencias que con los años se han ido tratando de mitigar, más aún con las normativas ambientales que han ido apareciendo y que cada vez son más estrictas.

Dentro de las consecuencias y problemas ocasionados por el polvo más comunes, encontramos:

Poca visibilidad en caminos

El levantamiento de polvo a raíz del transporte de material por camiones de gran envergadura trae consigo consecuencias como la poca visibilidad de los conductores, lo que se puede traducir en accidentes de tránsito al no poder visualizar otros vehículos en el camino, equipos desbarrancados, disminución en la velocidad de los camiones de transporte y en consecuencia un aumento del tiempo de ciclo de estos, disminuyendo su productividad.

Comunidades cercanas

Las comunidades cercanas a las labores mineras también se pueden llegar a ver muy afectadas por el polvo que surge de estas, transformándose en un problema de gran magnitud para la población de riesgo que, principalmente, está compuesta por ancianos, embarazadas, enfermos crónicos y niños; generando u acelerando enfermedades pulmonares y cardiacas. Por otro lado, el contaminante podría tener un efecto negativo sobre el funcionamiento biológico de la vegetación [8], así también en animales que vivan en el sector afectado.

Enfermedades laborales

Los trabajadores que se encuentran en faena han sido por muchos años los más afectados por las emisiones de material particulado respirable MP_{10} y $MP_{2.5}$ que son capaces de penetrar todo el sistema respiratorio hasta los pulmones [3]. Esto principalmente porque se encontraban expuestos constantemente a estas sin tener la protección adecuada. Si bien, la utilización de elementos de protección personal (EPP) actualmente es un requisito fundamental para poder trabajar en operaciones mineras, las enfermedades laborales producidas por el polvo se siguen presentando. Una de las principales enfermedades que se ven en este rubro es la neumoconiosis, la cual consiste en una enfermedad pulmonar producida por la infiltración de material particulado de origen mineral o vegetal; esta puede recibir diferentes nombres dependiendo de su origen, algunos ejemplos son:

- Silicosis: producida por partículas de sílice
- Silicatos: producida por la exposición a partículas de silicatos
- Asbestosis: producida por la exposición asbestos
- Neumoconiosis del trabajador del carbón: producida por la exposición a partículas de carbón.

Actualmente estas enfermedades son tratadas y controladas, sin embargo, no existe una cura absoluta.

Otras enfermedades asociadas a la exposición de material particulado son enfermedades respiratorias como asma y bronquitis crónica, alergias, irritación nasal, conjuntivitis, cáncer pulmonar, entre otras.

2.1.4 Supresores y equipos para la supresión de polvo

A través de los años se han desarrollado diferentes metodologías que permiten el control del polvo ya sea en caminos rurales, sectores de construcción o lugares donde se desarrollen actividades que faciliten la aparición de este contaminante, como es la minería. Uno de los recursos más utilizados para esta labor es el agua, cuyas propiedades permiten mantener durante cierto tiempo el control del polvo. Según los datos entregados por COCHILCO el gasto de agua en el área mina, la cual principalmente corresponde a gastos de supresión de polvo en caminos, es aproximadamente el 5% de toda el agua utilizada en el proceso minero, así en el año 2019 se ocupó cerca de 0.64 m³/s solo en la supresión de polvo [9]. Debido al gran consumo de este recurso y considerando que es limitado, ha sido necesario encontrar otras soluciones más eficientes.

Supresores de polvo

Con los años se ha vuelto más común la utilización de supresores diferentes al agua, los cuales tienen en común que permiten importantes ahorros de agua, reducción de material particulado, aumentan la vida útil de los neumáticos, equipos y maquinaria para la operación [10], además de otros beneficios.

- Bischofita: es un producto natural compuesto en un 97% por cloruro de magnesio hexahidratado y en un 3% por otras sales. Este se obtiene por evaporación y posee diversas propiedades que le permiten cumplir con el papel de supresor como la capacidad de unir las partículas finas estabilizando la carpeta de rodadura, es higroscópica, lo que le permite

absorber humedad del ambiente cuando esta es superior al 32% y es 3.1 veces más resistente a la evaporación que el agua [10]. Además, es inocuo, no reactivo, toxico ni corrosivo, sin embargo, un derrame en grandes cantidades y concentración podría causar daño a la vegetación debido al cloruro.

Para su aplicación se mezcla con agua y se riega sobre el camino, utilizando un camión aljibe, bajo pautas técnicas para determinar dosis y velocidad de aplicación. Luego de esto, la bischofita traspasa agua a los caminos de forma natural, ligando las partículas finas evitando que el tráfico levante polvo.

Con esta se logra reducir en un 80% el nivel del polvo y en un 90% el consumo de agua destinado a caminos. El periodo de mantención es variable y depende en gran medida del tipo de camino, el transito o la cercanía de una fuente fija.

- Emulsión Bituminosa: es generada a partir de la base no extraída del crudo, es decir, es un derivado de hidrocarburo no petroquímico. Al igual que la bischofita se mezcla con agua y se utiliza un camión aljibe para su aplicación. Cuando el agua se comienza a evaporar se separa de la solución y se comienza a formar la carpeta. Posteriormente, se compacta con el peso de los equipos o con compactación mecánica externa. Esto permite que el camino no genere más polvo ya que la emulsión encapsula las partículas.

Dentro de sus principales características se encuentra que no es higroscópica, es degradable e impermeable y no contamina las capas inferiores de los caminos, logrando superficies estables y de gran adherencia, obteniendo una carpeta de fácil rodado y libre de polvo.

Utilizar este supresor permite un ahorro del 90% en riego, una reducción del 75% en la flota necesaria, aumento de la vida útil de los neumáticos en un 10% y en cuanto al polvo se logra controlar más del 90% de este [10].

La mantención de los caminos depende de la frecuencia con la que pasan vehículos por el sector. Esta se puede realizar cada un par de días en los caminos más frecuentados y aquellos con menos tránsito pueden durar meses sin mantención.

- Polímeros Naturales: son derivados de elementos naturales como corteza de árbol y algunos tienen microorganismos que mantienen por un tiempo más prolongado la humedad. Se aplica con agua, al igual que los otros supresores, y gracias a su capacidad de transmitir humedad logra aglomerar las partículas y absorber el polvo.

La concentración, dilución y cantidad de aplicaciones dependen de terreno, principalmente del suelo y el tipo de roca. Así hay aplicaciones que se deben hacer una vez al día y en otras varias semanas después.

Aplicar este supresor disminuye el uso de agua entre un 80 y 90%, las concentraciones de polvo entre un 70 y 80%, disminuye la flota de camiones regadores y la generación de CO₂ [10].

Equipos para la supresión de polvo

Lo más tradicional en cuanto a supresión de polvo es la utilización de camiones aljibes, los cuales mediante un sistema de cabezas rociadoras y, en algunas ocasiones, cañones de agua, son capaces de recorrer los diferentes caminos y regarlos ya sea con agua u otro supresor, pudiendo variar la capa que dejan de estos al modificar su velocidad y la abertura de los rociadores. Sin embargo, estos son mayormente utilizados para la humectación de caminos. Cuando el punto en donde se quiera controlar el polvo es otro o más bien fijo, existen otras opciones que pueden ser más eficientes.

Para los siguientes equipos se utiliza neblina seca, la cual consiste en millones de gotas submicronicas que colisionan con las partículas de polvo suspendido, de modo que al unirse forman una partícula que, a mayor peso, precipitan en el fondo evitando que se levante nuevamente [11]. Algunos lugares donde se utilizan estas tecnologías en la actualidad son Minera Los Pelambres y Minera Carmen de Andacollo.

- Cañón nebulizador o Fog cannon: este genera una neblina con gotas de tamaño muy próximo al tamaño de partículas en suspensión que chocan con estas aumentando el peso de la partícula obligándola a precipitar, humedeciendo el suelo [12]. Estos cañones existen en grandes variedades, tanto en alcance como en consumo de agua, sin embargo, son equipos que se utilizan en un punto fijo. Actualmente minera Los Pelambres tiene incorporados estos equipos en sus trabajos.
- Confinamiento o cupulas: son espacios cerrados que evitan que el polvo se disperse en el medio. Se colocan en los puntos de generación de polvo como son las correas transportadoras, chancadores, harneros, etc. Se procura que sean herméticos. El confinamiento por sí solo puede reducir el 50% del polvo disperso [11].
- Barra porta boquilla o aspersor: el ensamble de la barra es el dispositivo que sujeta las boquillas de aspersión y en general se utiliza en conjunto con el confinamiento. La barra conduce el suministro de aire y agua a las boquillas. Por medio de válvulas se regula el flujo de aire y agua en cada barra.

El consumo de agua y aire está definido por el número de boquillas o aspersores, la cantidad de agua es mínima y tan solo se requiere que no lleve solidos en suspensión. La dureza del agua no afecta la calidad de la niebla seca, ya que el sistema no requiere de químicos ni tenso-activos [11].

2.2 Camiones Regadores

Existen variados modelos de camiones que se utilizan para regar, sin embargo, para este caso en particular, se seleccionaron equipos cuyos estanques son diseñados especialmente para la base de un camión de transporte. La empresa MegaCorp produce estanques los cuales se adecuan a los distintos modelos de camiones Caterpillar y Komatsu que van desde los 22000 litros hasta 158000 litros aproximadamente y cuyas características, como el número de rociadores y su apertura, dependerán de las necesidades del usuario [13].

Para este caso se trabaja con un camión Caterpillar modelo CAT 773, el cual utiliza un estanque modelo MTT13. Si bien, cada modelo de camión tiene sus características propias, en términos generales poseen una estructura similar. En las figuras 2.2 y 2.3 se visualiza su estructura y en la tabla 2.1 se presentan sus dimensiones tanto para el camión en general como para el estanque seleccionado del modelo anteriormente nombrado.

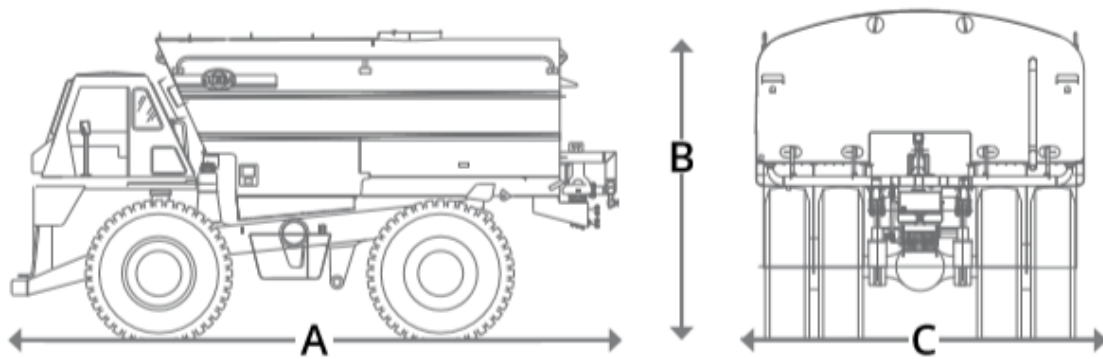


Figura 2.2. Dimensiones camión aljibe [14].

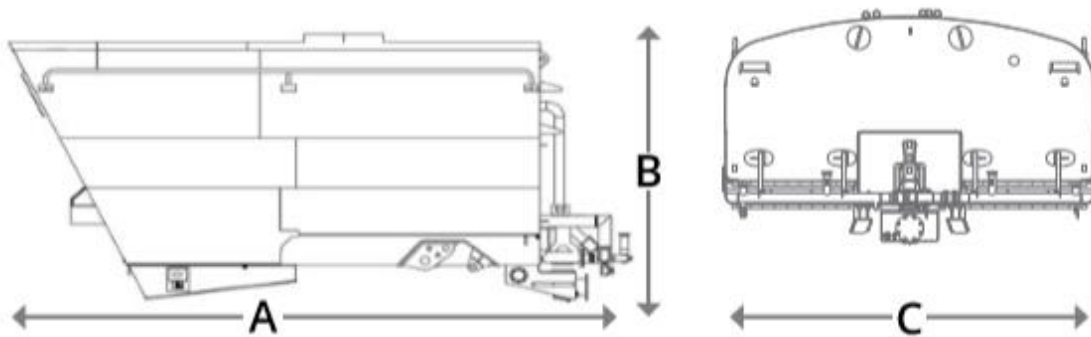


Figura 2.3. Dimensiones estanque camión aljibe [14].

Tabla 2.1. Valores dimensiones camiones y estanques MTT13 [14].

| CAT 773 (MTT13) | | |
|-----------------|-------------|---------------|
| | Camión [mm] | Estanque [mm] |
| A | 10363 | 7772 |
| B | 5207 | 3505 |
| C | 4649 | 4597 |

2.2.1 Descripción del Sistema

Los camiones aljibes se componen de distintas partes y sistemas que en conjunto le permiten cumplir con su función. A continuación, se explica a grandes rasgos las principales partes que lo componen y permiten su funcionamiento.

En las figuras 2.4 y 2.5 se presenta el camión aljibe desde una vista posterior y lateral junto a la ubicación de algunas partes relevantes de este.

1. Bomba de agua y motor hidráulico
2. Carrete para manguera
3. Control de la cabina
4. Cabezas rociadoras
5. Pasamanos y pasarelas
6. Sistema cañón de agua
7. Caja de control hidráulico

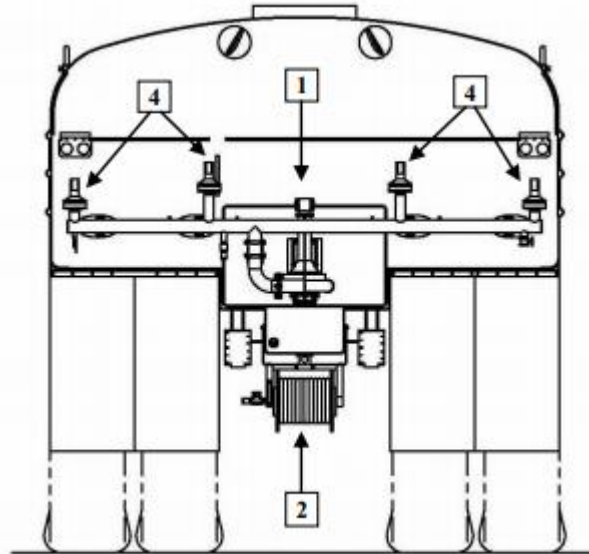


Figura 2.4. Vista posterior camión aljibe [13].

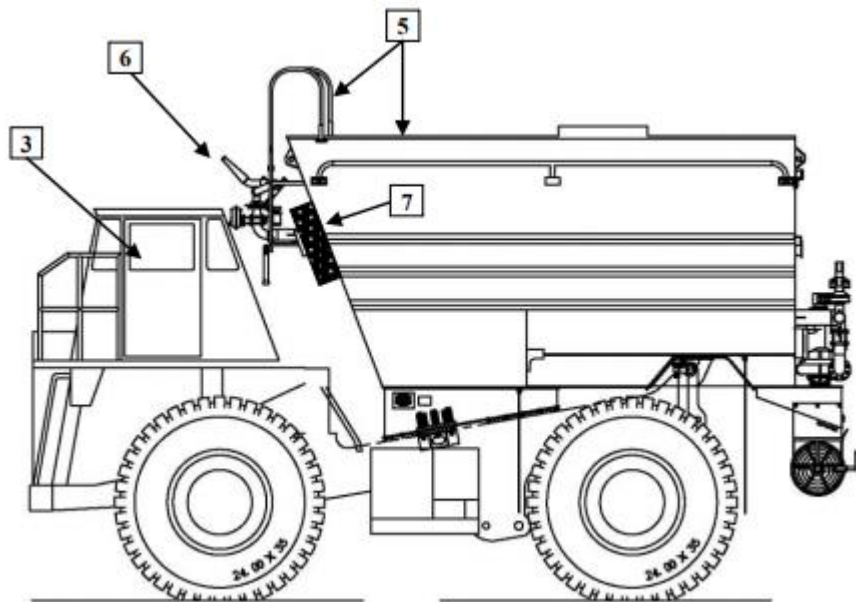


Figura 2.5. Vista lateral camión aljibe [13].

Tanque de agua

Es el recipiente en el cual es llevada el agua con la que se riegan los caminos. La estructura del tanque se encuentra construida alrededor y sobre la superficie del túnel de agua, el cual a su vez sirve de apoyo para la placa de piso, la estructura de pivote, los deflectores y el sistema de montaje de la bomba de agua. Las placas del piso tienen como función transportar cargas, mientras que los

deflectores y tabiques aumentan la resistencia del tanque y regulan la sobrepresión del agua. Por otro lado, las tuberías internas y externas conducen el agua desde la bomba hasta: cabezas rociadoras, sistemas de cañón de agua, barra rociadora, carrete para manguera, barra de descarga y desagüe del tanque [13].

Bomba de agua

Es una máquina que transforma energía con el fin de bombear o mover el agua de un lugar a otro. En el caso del aljibe, para que el agua dentro del estanque sea expulsada por algunos de los sistemas de riego del camión. Sus componentes principales y funciones se encuentran en el ANEXO B.

Motor de mando hidráulico

Los motores hidráulicos son máquinas que transforman energía cinética del fluido en energía mecánica rotativa. En este caso, el motor genera la energía necesaria para que la bomba de agua del camión funcione.

Sistema de cañón de agua

El cañón corresponde a una vía metálica que es capaz de mover un chorro de agua en sentido vertical y de izquierda a derecha. Estos pueden ser hidráulicos o eléctricos, dependiendo de ello el accionar del sistema será diferente.

Este sistema permite montar diferentes boquillas o formadores de chorro que contribuyen a una utilización adecuada según sea el caso. Entre ella encontramos:

- Boquillas con cavidad lisa, normales y apiladas.
- Formador de chorros en línea.
- Boquilla de ajuste manual, para niebla/chorro o abanico/chorro.
- Boquilla de ajuste remoto, para abanico o chorro.

En minería el cañón es útil para disminuir el polvo que se genera en sectores como pilas de acopio o lugares donde trabajen cargadores.

Sistema rociador.

El sistema de cabezas rociadoras se compone de 4, 6 u 8 rociadoras de accionamiento hidráulico o neumático, controles de cabina, un conjunto de caja de control de solenoides y mangueras hidráulicas o neumáticas.

- Cabeza rociadora: es una válvula con cuerpo de aluminio de 2 piezas y un anillo ajustable montados en el tubo colector de un suministro de agua.
- Anillos ajustables: se usa para regular el ancho de rociado, el cual se puede modificar entre 15° y 90°, y el flujo del agua, cuyas ranuras pueden ser de ¼" y 3/8".

Barra de descarga

Barra que contiene una serie de hileras con orificios de 3/8" de los cuales sale agua. Esta barra es alimentada mediante gravedad o presión.

Desagüe del tanque

Es una tubería utilizada para vaciar el agua del tanque. Se puede hacer de forma hidráulica o eléctrica, y dependiendo de esto será el procedimiento para llevarlo a cabo.

Carrete para manguera

Se encuentra ubicado en el extremo inferior trasero del tanque de agua. Está equipado con una manguera de goma reforzada de 1" o 1.5" de diámetro y una boquilla extintora de incendios.

Sistema de circulación de agua

Es un sistema que consiste en el ensamble de la válvula mariposa hidráulica y un tubo perforado de 4" ubicado dentro del tanque de agua. Este desvía el flujo de agua desde el sistema de rociado al tubo perforado y hace circular el agua al tanque.

Para operar el sistema de rociado, es necesario cerrar la válvula de circulación y cañón de agua.

2.2.2 Rendimiento

El rendimiento del camión depende de diversos factores como el número de rociadores, la abertura de estos, como se encuentre alineados, el ángulo en que se encuentren dispuestos, además de los requerimientos del usuario. Con esto también se puede definir el patrón y alcance de rociado del equipo.

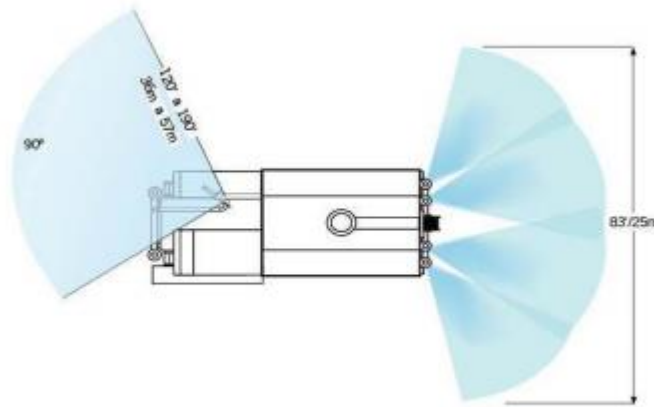


Figura 2.6. Ejemplo de patrón y alcance de rociado [13].

En la figura 2.6 se aprecia un ejemplo del alcance del cañón de agua y de los rociadores. Según la disposición de estos últimos, el alcance horizontal puede ser mayor o menor según lo que sea necesario o la capa de agua que se requiera. Además, también se puede seleccionar cuantos rociadores funcionarán, este factor también influye en cuanto podrá abarcar el riego.

Así, en términos generales el rendimiento estándar del rociado del vehículo se puede ver en función de la cobertura del deflector de la cabeza rociadora, la velocidad del vehículo y un volumen del líquido específico (ver ANEXO C).

2.3 Puntos de llenado

Los puntos de llenado corresponden a estaciones, en las cuales, mediante la utilización de elementos como tuberías, mangueras, bombas de agua y cuerpos de agua, se encargan de abastecer a los camiones aljibes para que puedan seguir con su labor. Estas se pueden encontrar espaciadas

dependiendo de la necesidad y requerimientos de cada mina, así también como de los recursos disponibles.

2.3.1 Estructura y Funcionamiento

Existen distintas formas de llenar un camión aljibe, por esto existen distintas estructuras para hacerlo. El estanque del camión aljibe puede ser abastecido mediante la utilización de una manguera (figura 2.7), la cual mediante la conexión a una bomba es capaz de llevar agua a este [15].

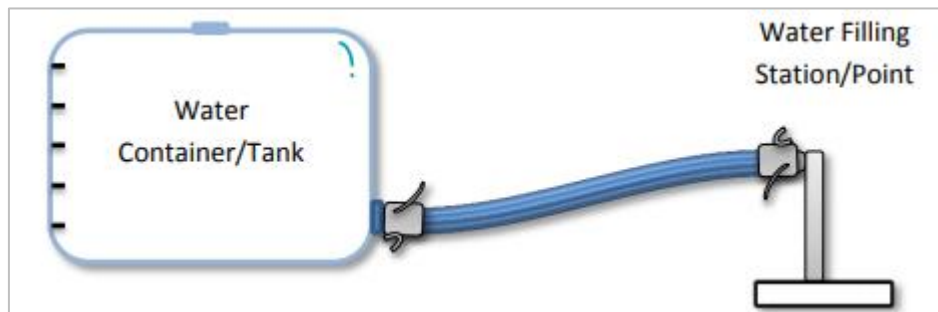


Figura 2.7. Punto de llenado con manguera [16].

También es posible realizarlo con "stand pipe" o tuberías verticales (figura 2.8) las cuales permiten llenar el estanque por la parte superior de este [16].

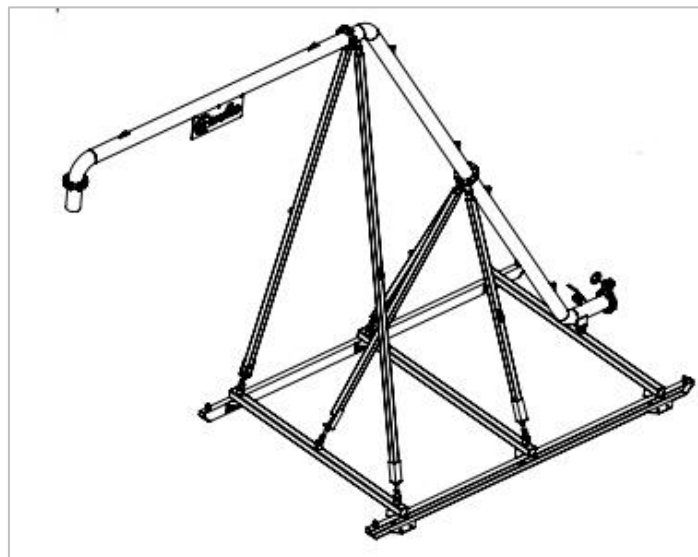


Figura 2.8. Punto de llenado mediante tubería vertical. [17]

La velocidad de llenado del camión depende del diámetro de cada uno de estos sistemas. En el caso de la tubería vertical, se encuentran especificaciones de sus dimensiones y capacidad en los

catálogos de estas (ver ANEXO D) con esto es posible calcular el flujo y posteriormente el tiempo de llenado.

2.4 Mina A

Para llevar a cabo el trabajo se utiliza una fuente de datos de una mina a rajo abierto real, la cual llamaremos Mina A.

Mina A se emplaza en zona de montaña a 3500 m sobre el nivel del mar y a 65 km de la ciudad, pero contando con asentamientos a menor distancia. Extrae Cobre y Molibdeno utilizando el método superficial Cielo Abierto.

En cuanto a su clima, cuenta con ambos extremos. En verano se producen altas temperaturas alcanzando más de 30 °C, mientras que en los meses de invierno las temperaturas caen hasta 0°C o menos, teniendo como parte del clima, la nieve.

Para todos los procesos que sean necesarios, Mina A cuenta con derechos de aprovechamiento de aguas en un río y 3 esteros dentro de las camunas cercanas a su faena y planta. Del agua del proceso productivo 80% es recirculada, la cual, permite abastecer un 45% del requerimiento total del agua.

2.4.1 Sistema de regadío actual

Las altas temperaturas en los meses de primavera-verano, la gran cantidad de equipos que se movilizan dentro de la mina, las actividades de perforación y tronadura, carguío y transporte, así como también el viento, son algunos de los principales factores que ayudan con el levantamiento de polvo o material particulado. Es por esto que mina A cuenta con un sistema de regadío que contribuye a la supresión del polvo. Mina A tiene 4 camiones aljibes trabajando en los distintos caminos que corresponden a un recorrido de 26 km aproximadamente. Además, posee 3 puntos de llenado a los cuales estos camiones tienen acceso, estos se explican mejor en los siguientes puntos.

Camiones regadores en Mina A

Los 4 equipos que posee esta mina para sus operaciones son del modelo CAT 773 de Caterpillar con estanque modelo MTT13, el cual posee una capacidad de 49,000 litros. Cada camión tiene en su parte posterior 4 rociadores con abertura de 3/8", lo que deja una capa de agua en la superficie del camino entre 1.11 mm y 0.74 mm aproximadamente dependiendo de la velocidad a la que circule el

camión. La duración de esta capa depende de la temperatura, viento y cantidad de equipos que circulen por el sector.

La velocidad máxima dentro de la mina es de 50 km/h, sin embargo, los camiones aljibes tiene una velocidad máxima de riego de 24 km/h, esto para lograr un regado eficiente y lograr la capa de agua requerida en el camino.

Cuerpos de Agua

La mina A cuenta actualmente con 3 puntos de llenado ubicados en diferentes sectores de la mina (figura 2.9). Cuenta, además, con otro cuerpo de agua al cual los camiones aljibes no tienen acceso, sin embargo, esta es distribuida a otros lados a través de tuberías.

El agua de estos se obtiene de deshielos, acumulación natural y por gravedad, y de la captación de los esteros y río anteriormente mencionados.

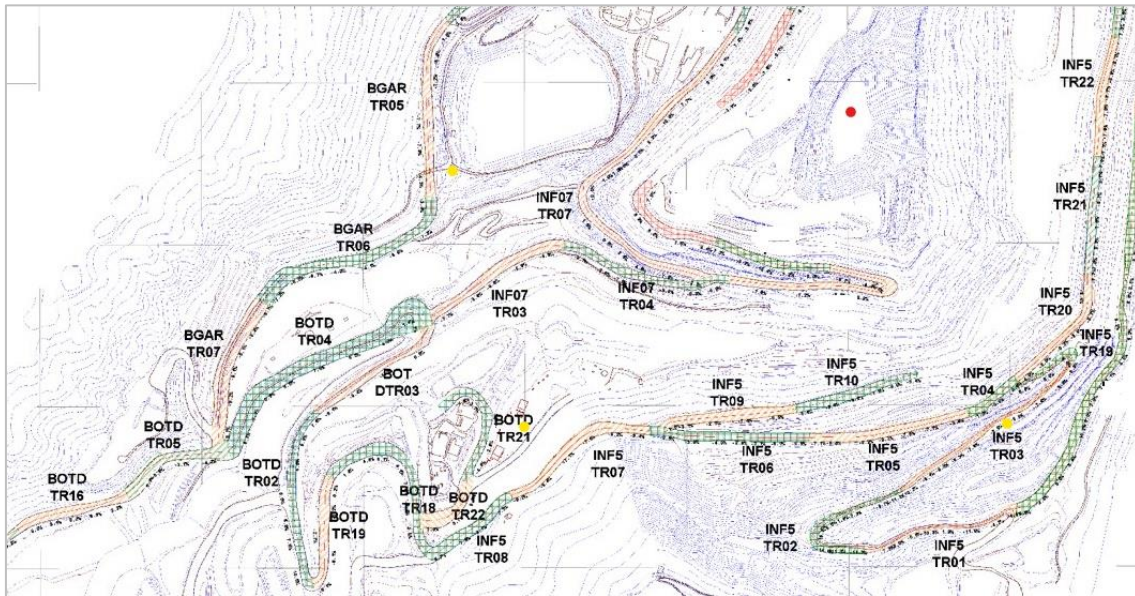


Figura 2.9. Ubicación de los puntos de agua. El punto rojo es aquel al que no se tiene acceso directo y los amarillos a los que sí.

Procedimiento de Regadío

Para que el regadío sea eficiente y no se genere barro en los caminos, existe un procedimiento de regadío determinado por la mina, el cual dependerá, principalmente, de la temperatura del lugar.

Cuando hay bajas temperaturas, o sea, temperaturas menores a 5 °C, el procedimiento consiste en 10 metros regados y 50 metros no regados en una misma dirección. En la dirección contraria, el camión aljibe realiza lo mismo, pero de forma intercalada a la primera dirección. Esto se aprecia en la figura 2.10.

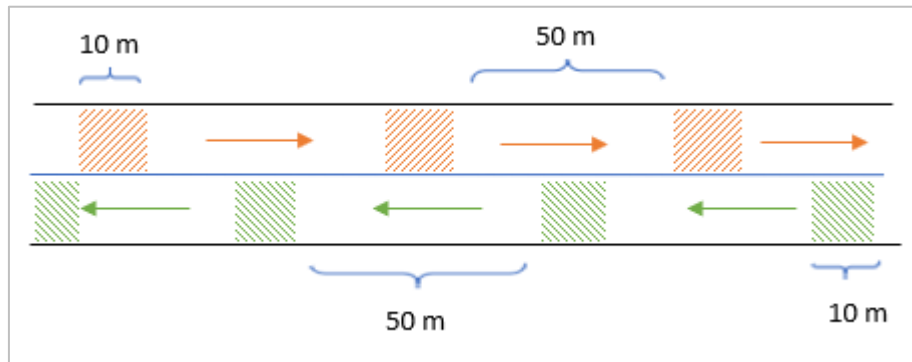


Figura 2.10. Procedimiento de regadío para temperaturas menores a 5 °C.

Cuando las temperaturas son altas, mayores a 5°C, los camiones aljibes deben regar 50 metros y luego no regar los siguientes 50 metros en una misma dirección. En la dirección contraria, el camión riega de la misma forma, pero con el patrón contrario a la primera dirección (figura 2.11).

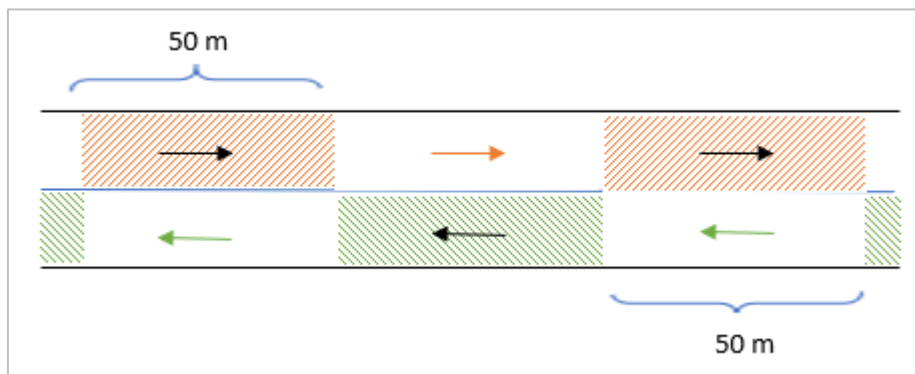


Figura 2.11. Procedimiento de regadío para temperaturas mayores a 5°C.

2.5 Simulación

La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema y/o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema [17].

Los avances a través de los años han puesto a la simulación como un recurso indispensable en la actualidad para las distintas industrias que quieren evaluar nuevas posibilidades, costos y planificar sus acciones futuras.

2.5.1 Simulación en minería

En las operaciones mineras, los métodos de simulación pueden ser utilizados para simular diferentes sistemas y estudiar diversos aspectos tales como flotas, manejo de materiales y planificación minera con el objetivo de optimizar, mejorar y analizar sistemas existentes y futuros [18]. Estudios y simulaciones que giren entorno a operaciones como carguío, transporte y manejo de material se realizan constantemente y es conocida la utilización de software para estas. Sin embargo, cuando se habla de equipos de servicios como los camiones regadores es más difícil recopilar información.

Existen software de simulación específicos para minería como son DSim y SimMine, así como otros más generales como Flexsim, ProModel y Arena.




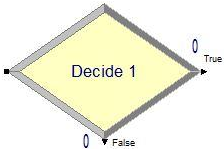
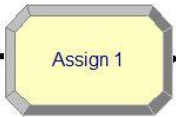
2.5.2 Arena



Arena es un software de simulación de eventos discretos, los cuales describen un proceso con un conjunto de eventos únicos y específicos en el tiempo [19]. Este permite a las empresas evaluar los cambios en sus operaciones y evaluar el impacto de factores externos que puedan influir en estas. En el caso de la minería es capaz de evaluar factores como el clima y la variación de precios de las materias primas, permitiendo de esta manera reducir costos y sacar un mayor provecho a los activos y recursos mineros existentes.

Con Arena se crea un flujo de proceso de manera rápida e intuitiva, permitiendo crear simulaciones y visualizar resultados involucrando capacidades de animación 2D y 3D. Además, proporciona análisis de modelos e información útil para comprender mejor los procesos.

Para esto, el software cuenta con una serie de paneles compuestos por diferentes módulos que al interactuar entre si generan este flujo del que se habla anteriormente. Se presentan algunos módulos, los cuales son utilizados en este trabajo:

Tabla 2.2. Módulos software ARENA [19].

| Representación | Descripción |
|---|---|
|  | <p>Módulo perteneciente al panel de proceso básicos, corresponde al punto de inicio de las entidades en la simulación. Las entidades son creadas usando una calendarización o un tiempo entre sus llegadas. Luego están dejan el módulo para comenzar a viajar por el sistema. En este módulo se define el tipo de entidad.</p> |
|  | <p>Modulo perteneciente al panel de procesos básicos, corresponde al punto final al cual llega la entidad para terminar la simulación.</p> |
|  | <p>Modulo perteneciente al panel de procesos básico, representa el proceso o actividad que realiza la entidad. Este módulo es el principal método de procesamiento en la simulación y posee opciones para tomar y liberar los recursos disponibles.</p> |
|  | <p>Este módulo permite tomar decisiones en el sistema. Tiene las opciones de tomar decisiones basadas en probabilidades o en condiciones. Estas últimas pueden estar asociadas a atributos, variables, tipos de entidades, entre otras.</p> |
|  | <p>Este módulo se utiliza para asignar nuevos valores a variables, atributos de entidades, tipos de entidades u otras variables del sistema. Se pueden hacer varias asignaciones en un mismo modulo.</p> |

| | |
|---|--|
|  | <p>El módulo route se encarga de transferir la entidad a la estación especificada en este. Permite definir el tiempo de transferencia de un módulo a otro.</p> |
|  | <p>El módulo station define la estación o set de estaciones correspondientes a la ubicación física o lógica donde ocurre el procesamiento.</p> |

En este trabajo, Arena es el software mediante el cual se realizan las simulaciones para cumplir con los objetivos mencionados anteriormente, determinando la secuencia de procesos y ubicación de los recursos como son camiones aljibes y puntos de llenado.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Datos a utilizar

En base a lo que se presenta en la sección anterior, se conocen diferentes aspectos e información con los que se trabaja. En esta sección, se resumen los datos a utilizar en la simulación, aquellos que se determinan de forma arbitraria debido a las limitaciones del trabajo y aquellos obtenidos mediante algún cálculo.

Para el desarrollo de la simulación se trabaja con los camiones anteriormente nombrados en la sección 2.4.1. A continuación, se presenta la tabla resumen de los camiones aljibes.

Tabla 3.1 Características camiones aljibes.

| | |
|------------------------|-------------|
| Modelo Camión | CAT 773 |
| Marca | Caterpillar |
| Capacidad camión [T] | 60 |
| Modelo estanque | MTT13 |
| Capacidad estanque [L] | 49,000 |
| Numero de rociadores | 4 |
| Abertura rociador ["] | 3/8 |

Como se mencionó anteriormente, la capa de agua que deja el camión puede variar, esto depende de la velocidad a la que se mueva el camión. En la tabla 3.2 se aprecia el resultado de esto, donde el camión es capaz de dejar una capa de agua más gruesa si es que su velocidad es menor y una más fina cuando se mueve a mayor velocidad. La distancia de regado también se ve afectada por la velocidad, pero de manera inversa a la capa de agua, es por lo que cuando el camión va a mayor velocidad, la distancia de regado que alcanza también es mayor y viceversa.

Tabla 3.2. Capa de agua y distancia de regado según velocidad de avance.

| Velocidades [km/h] | MTT13 | |
|--------------------|-------------------|-------------------------|
| | Capa de agua [mm] | Distancia de regado [m] |
| 3 | 5.59 | 438 |
| 8 | 2.23 | 1108 |
| 16 | 1.11 | 2217 |
| 24 | 0.74 | 3325 |

Si bien la cantidad de agua que queda en el camino y la longitud del camino que se alcanza a regar varían con la velocidad, hay factores o variables que no dependen de esta y que son importantes para el desarrollo del trabajo. Considerando que el camión tiene una capacidad en su tanque fija y que el número de rociadores, así como su apertura, son siempre los mismos se puede determinar que el riego se realiza con un flujo constante, por lo que el estanque se vaciará por completo al alcanzar cierto tiempo regando. En el caso del modelo MTT13 será a los 8.31 minutos. Sin embargo, considerando el patrón de regado explicado anteriormente, se tiene que el tiempo de regado para MTT13 será de 16.62 minutos.

En cuanto a las velocidades de regado, estas dependen de varios factores. Entre ellos se encuentra la velocidad máxima a la que deben andar estos para cumplir con una capa de agua que sea apropiada y útil. Bajo esta premisa, se tiene que 24 km/h es la velocidad máxima de regado. Por otro lado, si la pendiente se encuentra muy inclinada, entonces puede que el camión no pueda ir a máxima velocidad, en este caso el camión se tiene que limitar a viajar a la velocidad que él mismo se permita. Otro factor para tomar en cuenta es el tránsito de otros vehículos, es por esto que, aunque un camión aljibe pueda ir más lento y en consecuencia dejar una capa de agua que perdure más, muchas veces hacer esto no es posible, sobre todo en sectores donde los camiones de transporte se mueven constantemente ya que se estaría entorpeciendo la labor de producción.

Para determinar a qué velocidad se mueven los camiones aljibes se trabaja con las curvas de velocidades de ambos modelos, de manera de determinar cuál es la velocidad máxima a la que

pueden viajar estos en los diferentes tramos del camino y en consecuencia cuanto demoran en regarlos. Estas se pueden ver en el ANEXO E.

Tabla 3.3. Velocidad máxima en determinada pendiente.

| Pendiente | CAT 773D (MTT13) | |
|-----------|------------------|---------------|
| | Subida [km/h] | Bajada [km/h] |
| 10% | 16 | 24 |
| 9% | 19 | 24 |
| 8% | 21 | 24 |
| 7% | 24 | 24 |
| 6% | 24 | 24 |
| 5% | 24 | 24 |
| 4% | 24 | 24 |
| 3% | 24 | 24 |
| 2% | 24 | 24 |
| 1% | 24 | 24 |
| 0% | 24 | 24 |

3.2 Delimitación del mapa.

En la figura 2.9 se presenta el mapa de la mina A, esta posee una gran variedad de caminos que conectan entre ellos por lo que es necesario determinar rutas. Estas rutas toman un conjunto de tramos presentes en la mina con una longitud acorde a la capacidad del camión. De esta manera se determinan 9 posibles rutas (figura 3.1).

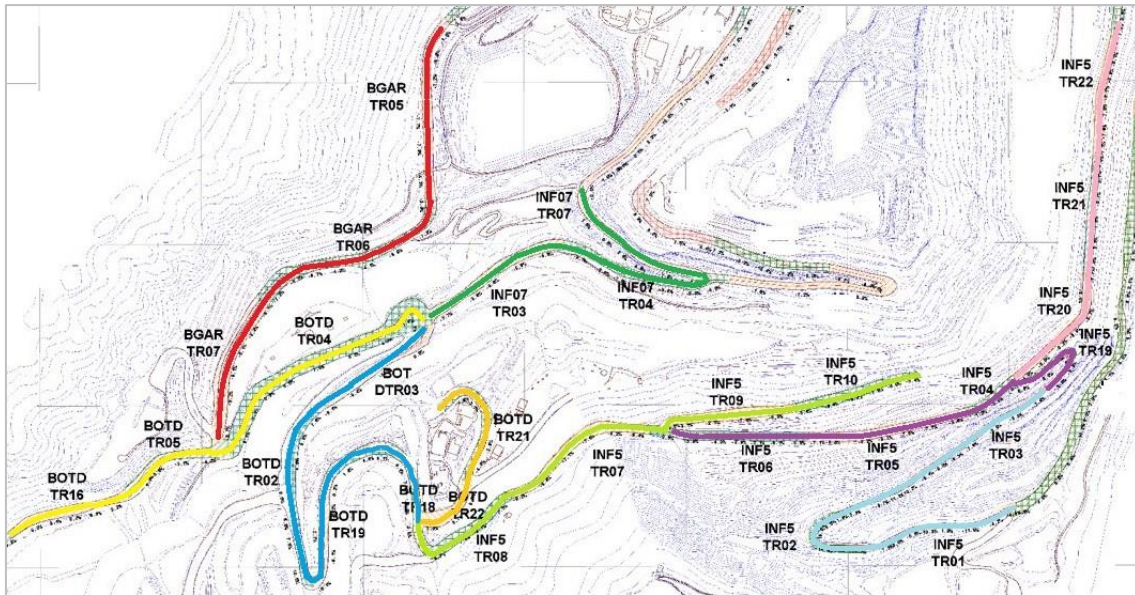


Figura 3.1. Mapa con rutas definidas.

Las rutas presentadas en la figura 3.1 son aquellas con las que se trabaja en la simulación y las que se consideran para cumplir con el objetivo de este trabajo. Entre ellas se encuentran los sectores más frecuentados de la mina en la actualidad y donde hay una mayor utilización de camiones aljibes. En la tabla 3.4 se presenta cada ruta junto a sus longitudes en una dirección correspondientes a cada una y el color representativos.

Tabla 3.4. Rutas y longitudes correspondientes.

| Ruta | Longitud ruta [m] | Color |
|--------|-------------------|--------------|
| Ruta 1 | 1620 | Rojo |
| Ruta 2 | 1497 | Amarillo |
| Ruta 3 | 1313,9 | Verde Oscuro |
| Ruta 4 | 2021,6 | Azul |
| Ruta 5 | 610 | Mostaza |
| Ruta 6 | 1921,6 | Verde Claro |
| Ruta 7 | 1403,6 | Morado |
| Ruta 8 | 1068,7 | Rosado |
| Ruta 9 | 1410 | Celeste |

Para efectos de la simulación, estas rutas se han agrupado en tres grandes sectores, teniendo en cuenta la ubicación de cada punto de llenado.

El camión no podrá andar todo el tiempo a una misma velocidad y se hace difícil poder predecir esta. Es por lo que, en base a los datos de velocidades mostrados en la tabla 3.3 y considerando las longitudes de la tabla 3.4, se trabaja con una distribución de probabilidad ad hoc a la problemática. En este caso, se trabaja con la distribución triangular obteniendo los datos de la tabla 3.5 a utilizar en la simulación.

Tabla 3.5. Tabla de datos distribución triangular para procesos de regado.

| Ruta | Mínimo [min] | Moda [min] | Máximo [min] |
|--------|--------------|------------|--------------|
| Ruta 1 | 4.1 | 4.1 | 6.1 |
| Ruta 2 | 3.7 | 3.7 | 5.6 |
| Ruta 3 | 3.3 | 3.9 | 4.9 |
| Ruta 4 | 4.9 | 6.1 | 7.6 |
| Ruta 5 | 1.5 | 1.5 | 2.3 |
| Ruta 6 | 4.8 | 5.8 | 7.2 |
| Ruta 7 | 3.5 | 3.5 | 5.3 |
| Ruta 8 | 2.7 | 2.7 | 4.0 |
| Ruta 9 | 3.5 | 5.3 | 5.3 |

Según el funcionamiento de la distribución triangular se trabajan los datos de manera de obtener solo aquellos necesarios. En este caso los parámetros necesarios son tiempo mínimo, moda y tiempo máximo en minutos. Lo que se trabaja según cada sector delimitado.

3.3 Cálculo de tiempo entre riegos

Para determinar si la frecuencia de riego de los caminos es adecuada es necesario saber cuánto tiempo debe pasar para que el agua regada se evapore. La velocidad de evaporación es tanto mayor cuanto más seca está la capa de aire en contacto con el líquido, o sea, cuanto más alejada está de la saturación; si el aire está saturado, cesa la evaporación [20].

El proceso de evaporación en un sistema abierto depende del tamaño de la superficie expuesta, de la humedad relativa, de la velocidad del viento y la temperatura. Otros factores como el uso de los caminos también influyen en la velocidad de la evaporación, ya que el paso de equipos o vehículos aumentan esta.

Para este trabajo se considera las temperaturas máximas y mínimas de los últimos 12 años en la zona. Así se obtuvo que el promedio de la temperatura máxima es de 24 °C y el promedio de la temperatura mínima es 11°C en los meses en que se evalúa la simulación. Además, se consideran como datos para este cálculo un 43% de humedad relativa y 9 km/h como la velocidad del viento [2].

Se calcula la tasa de evaporación [21] utilizando las temperaturas antes mencionadas. Esta tasa es diferente para cada ruta, ya que cada una posee un área de riego diferente debido a la longitud de estas. Ya con la tasa calculada, se determina el tiempo de riego para cada una de las rutas.

En la tabla 3.6 se muestran los datos obtenidos, donde “Tiempo 1” correspondiente al tiempo necesario para que, a 11°C, el agua se evapore en cada camino. “Tiempo 2” es el tiempo necesario para que se evapore el agua de cada ruta a temperatura máxima.

Tabla 3.6. Tiempo entre riegos para cada ruta a 11 °C y 24 °C.

| Ruta | Tiempo 1 [min] | Tiempo 2 [min] |
|--------|----------------|----------------|
| Ruta 1 | 102 | 45 |
| Ruta 2 | 100 | 44 |
| Ruta 3 | 109 | 48 |
| Ruta 4 | 105 | 46 |
| Ruta 5 | 109 | 48 |
| Ruta 6 | 111 | 49 |
| Ruta 7 | 107 | 47 |
| Ruta 8 | 108 | 47 |
| Ruta 9 | 111 | 49 |

Estos parámetros son relevantes al momento de evaluar los resultados de los distintos escenarios de la simulación y para llegar a una conclusión, ya que representan cada cuanto tiempo como máximo un camión debiera regar para mantener la zona humectada a distintas temperaturas. Esto significa que, los tiempos entre riegos deben encontrarse idealmente más cerca a los valores de “Tiempo 2” para así asegurar que se realiza un control de polvo adecuado incluso en horarios donde hay altas temperaturas.

Un valor de frecuencia de riego mayor a los dados en “Tiempo 1” supone un mal rendimiento y una mala opción para el riego de caminos, ya que, si no cumple con la frecuencia a temperaturas mínimas, ante cualquier otra temperatura mayor, el camino estará mucho tiempo seco.

3.4 Funcionamiento Software Arena

Para llevar a cabo la simulación es necesario visualizar cual será la estructura de esta, de forma de representar que es lo que se quiere hacer. Para esto se presenta la figura 3.2 donde se observa a grandes rasgos que es lo que se espera que haga el camión aljibe al simular.

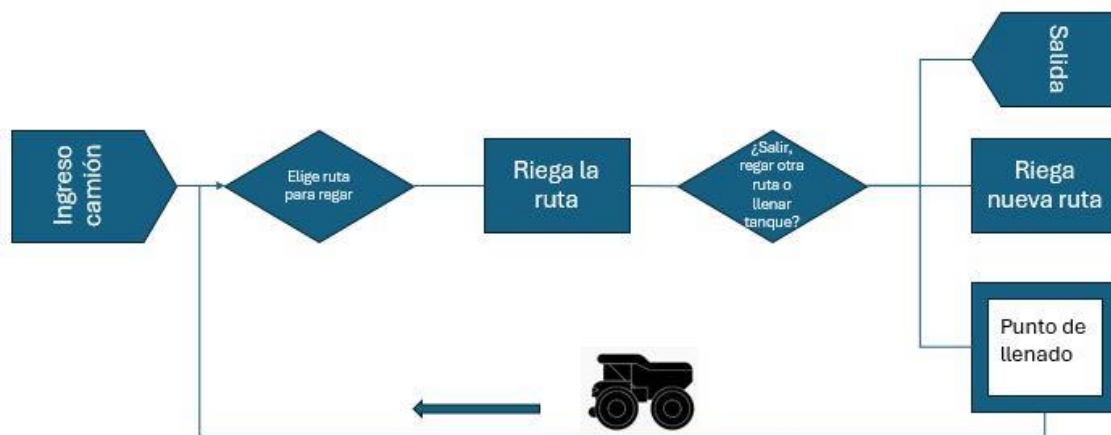


Figura 3.2. Funcionamiento simulación.

Tal como se presenta, el camión ingresa al sistema para luego seleccionar una ruta a regar. Posteriormente la ruta es regada y entonces el camión debe tomar la decisión de seguir regando otra ruta, ir al punto de llenado en caso de que la cantidad de agua en el estanque no sea suficiente o salir del sistema en caso de que el horario de trabajo haya acabado. Si la elección es ir al punto de llenado, entonces luego de haberse abastecido, el camión debe volver a elegir una ruta para regar.

Para llevar esto a cabo se utilizan los módulos presentados en la tabla 2.2 además de algunos otros elementos propios del software como recursos, atributos y variables entre otros especificados en el ANEXO F.

3.5 Desarrollo Simulación

Teniendo conocimiento de lo que se quiere lograr y de los datos e información necesaria, se puede dar paso al desarrollo de la simulación. Como se muestra en la figura 3.1, el mapa está compuesto por 9 rutas cuyas longitudes varían entre los 1000 y los 1700 metros aproximadamente. Estas a su vez, están divididas en 3 sectores representados en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Sectores delimitados para la simulación.

| Sector | Rutas | Punto de Llenado |
|----------|--------|--------------------|
| Sector 1 | Ruta 1 | Punto de Llenado 1 |
| | Ruta 2 | |
| | Ruta 3 | |
| Sector 2 | Ruta 4 | Punto de Llenado 2 |
| | Ruta 5 | |
| | Ruta 6 | |
| Sector 3 | Ruta 7 | Punto de Llenado 3 |
| | Ruta 8 | |
| | Ruta 9 | |

La separación de las rutas en sectores no tiene otro fin más que facilitar la simulación de estas y de acotar el número de módulos y elementos a utilizar. Además, para asegurar el regado de cada ruta, estas se separan en ruta de ida y de vuelta.

La simulación se lleva a cabo considerando un tiempo de trabajo de la flota de 8 horas. Sin embargo, esto y todos los datos que tengan relación con tiempo se expresan en minutos. Por lo que el tiempo de simulación es de 480 minutos.

3.5.1 Simulación Camión MTT13

Para iniciar el trabajo se comienza a desarrollar la simulación para el escenario inicial. Este contempla la utilización de una flota compuesta por 4 camiones aljibe que corresponde a la flota que actualmente se tiene en la Mina A.

Los camiones realizan la entrada al sistema mediante el módulo “Create”, en este caso nombrado como “Entrada MTT13” para luego tomar la decisión de que ruta tomar. Para este caso, el camión puede decidir entre los sectores 1,2 y 3, siendo este último el más lejano al punto de inicio, lo que supone a su vez, un mayor tiempo de viaje de la entidad o camión al sector.

El tiempo para llegar a cada sector y poder comenzar a regar se define en estos primeros módulos de proceso mostrados en la figura 3.3.

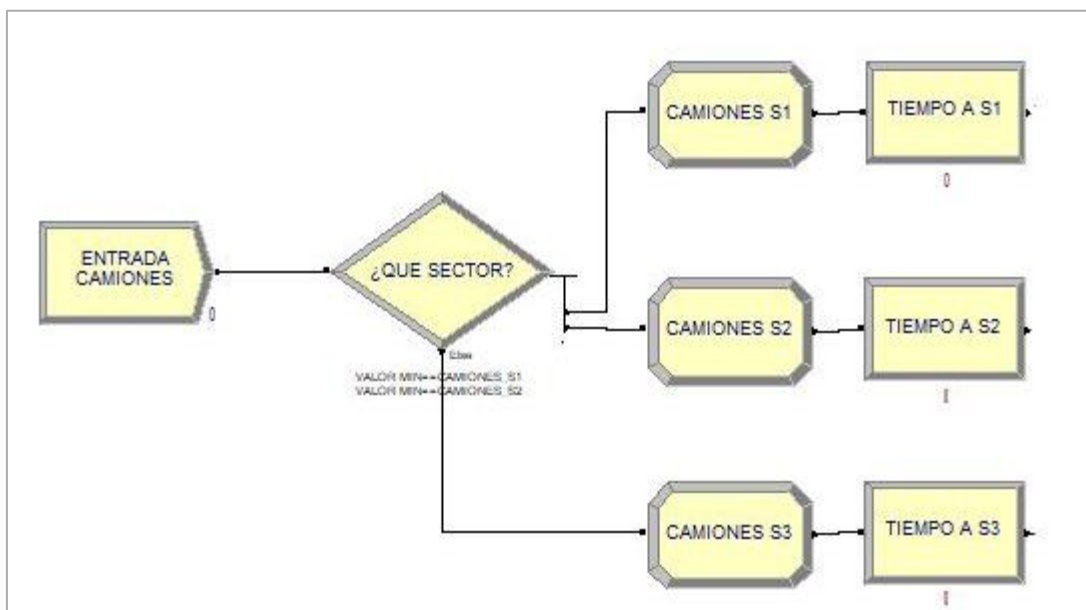


Figura 3.3. Entrada de camiones y elección de sector.

La decisión que se toma en esta primera parte está basada en si algún camión se dirigió o no a alguno de los sectores. De manera que, si el primer camión entro al sector 1, el siguiente no podrá hacer lo mismo y deberá elegir entre el sector 2 o el sector 3. Para lograr este punto se utilizan los módulos assign aquí nombrados como “CAMIONES S1/S2/S3”. En este se definen las variables que permiten ir contabilizando cuantos camiones han entrado a ese sector. Las especificaciones de esto se encuentran en el ANEXO G.

Los módulos “Tiempo a..” en la figura 3.3 solo suponen un tiempo de demora para el camión hasta llegar al siguiente punto, sin embargo, no realizan ningún otro tipo de actividad en este proceso.

Tras completar esta primera parte de la simulación, los camiones llegan al sector seleccionado en el cual deben volver a tomar una decisión, en este caso para optar por alguna de las rutas del sector. Al igual que para la primera parte, se utiliza un módulo de decisión cuya condición se basa en cuantos camiones han entrado a cada ruta, de modo de no repetir de forma consecutiva el regado en una misma ruta ni dejar a otra sin regar. En la figura 3.4 se aprecia el sector 1 compuesto por las rutas 1,2 y 3. El módulo de decisión nombrado como “CAMION 1” permite que la entidad pueda elegir si regar la Ruta 1I o la Ruta 3I representadas mediante un módulo de procesos, el cual contiene información como los tiempos de demora del camión en estas rutas presentados previamente en la tabla 3.5. Además, para cada ruta se define un recurso llamado "Camino". De esta forma cuando una entidad entre en alguna ruta, este recurso se verá tomado por esta entidad y por lo tanto ninguna otra podrá ocupar esa ruta.

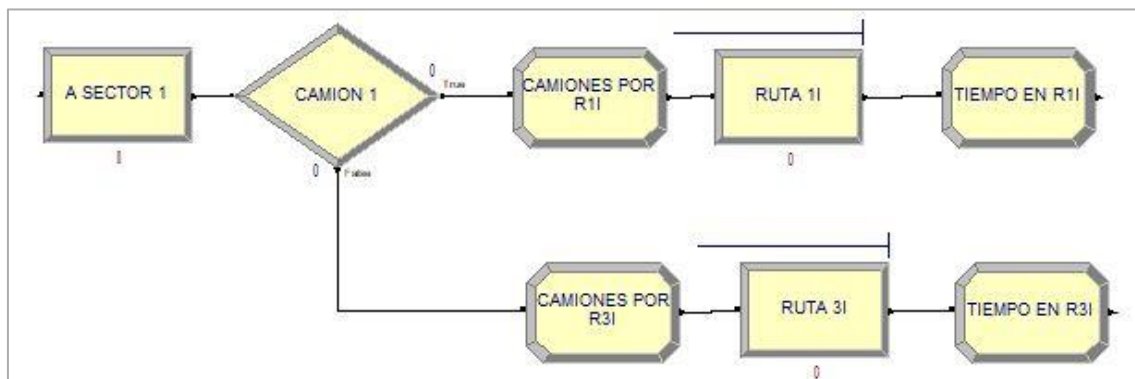


Figura 3.4. Selección de ruta.

Los módulos Assign “TIEMPO EN RUTA” posteriores a los módulos de ruta son en los que se ha definido las variables para determinar el tiempo efectivo en regando de cada camión. Esta información ayuda a determinar las condiciones que permitirán tomar las decisiones de llenado en el resto de la simulación.

Todas las rutas se encuentran separadas en dos módulos de proceso, los cuales representan la ida y la vuelta en una misma ruta. Esto permite asegurar el regado en ambas direcciones y también representa de mejor manera la conducción del camión y su paso de una ruta a otra. Al final de cada

ruta y posterior al módulo de tiempo en ruta se toma una decisión en base a la cantidad de agua que le queda al camión en su estanque. Este módulo de decisión con el nombre “AGUA” contiene las condiciones para decidir si el camión debe continuar regando, debe ir al punto de llenado o debe salir del sistema.

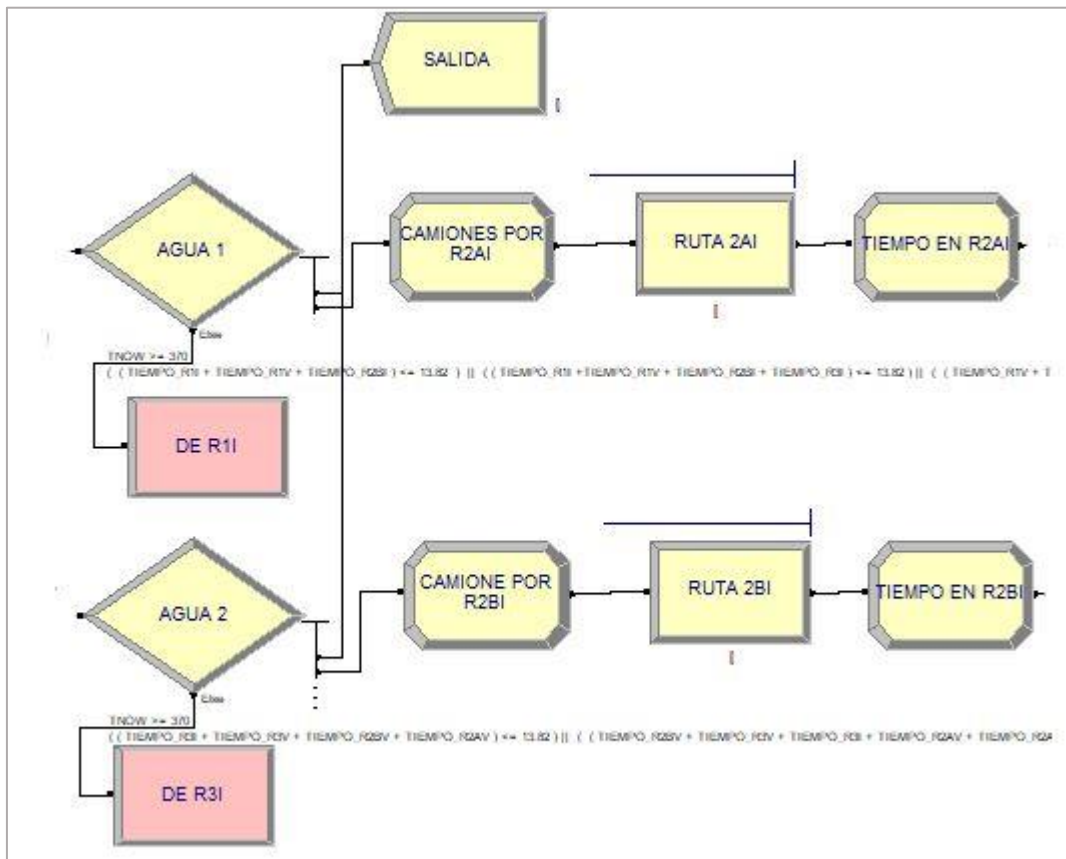


Figura 3.5. Toma de decisión para seguir regando.

Las condiciones necesarias para tomar algunas de estas decisiones se presentan a continuación:

- A estacionamiento o salida del sistema:

En toda la simulación, los módulos dispuestos implican la salida de la entidad del sistema. A cada uno de estos se le ha impuesto la misma condición de $TNOW \geq 370$ lo que significa que si han pasado 370 minutos o más tiempo desde que el camión comenzó sus recorridos, entonces este puede volver al estacionamiento. Los 370 minutos, surgen como condición de salida al restar tiempos “perdidos” para el trabajo del camión y que son difíciles de considerar en la simulación

como: tiempos de descanso o almuerzo del operador, tiempo de detención en ruta por situaciones fortuitas o trabajos de otros equipos, tiempos de recorrido hacia el estacionamiento, etc.

- Continuar regando la siguiente ruta:

Para que un camión pueda continuar regando otra ruta, debe tener un mínimo de agua en su estanque que le permita completar el siguiente recorrido. Para poder determinar esto, se realiza la suma de los tiempos de las rutas que el camión ya ha recorrido, cuyo total debería ser menor o igual a el tiempo de regado máximo del camión para seguir teniendo el mínimo de agua para la siguiente ruta. Por ejemplo, si se tiene que se debe decidir si continuar con el riego de “Ruta 2 vuelta”, para este caso algunas de las condiciones serían:

$$(Tiempo\ en\ ruta\ 1I + Tiempo\ en\ ruta\ 2I) \leq 9.2$$

$$(Tiempo\ en\ ruta\ 3I + Tiempo\ en\ ruta\ 2I) \leq 9.2$$

Para este caso se tienen dos condiciones ya que la primera ruta del camión podría haber sido tanto la “ruta 1 ida” como la “ruta 3 ida”, sin embargo, se debe cumplir solo una de ellas para que el camión continúe con el riego.

- A punto de llenado:

Si la primera condición no se cumple, significa que el camión aún está en horario laboral y debe continuar, si la segunda condición tampoco se cumple significa que la cantidad de agua que queda en el estanque no es suficiente para cumplir con el siguiente recorrido, por lo que el camión solo le queda la alternativa de ir a un punto de llenado.

Si como resultado del módulo de decisión, el camión pasa a la siguiente ruta para continuar el riego, entonces se continúa con los procesos ya antes mencionados, pero para otras rutas. En el caso del sector 1, después de recorrer cada ruta vuelve a aparecer el módulo de decisión “AGUA” pero con las condiciones correspondientes para cada uno, ya que la ruta a regar puede tener una longitud diferente y el camión puede haber pasado por distintas rutas antes de llegar a esta. En las zonas donde hay intersección de caminos, además de las condiciones sobre la cantidad de agua que le queda al camión, también hay módulos de decisión sobre el número de camiones en cada ruta, ya

que en estos puntos el camión tiene varias opciones para continuar su recorrido y debe seleccionar aquel que haya sido menos regado.

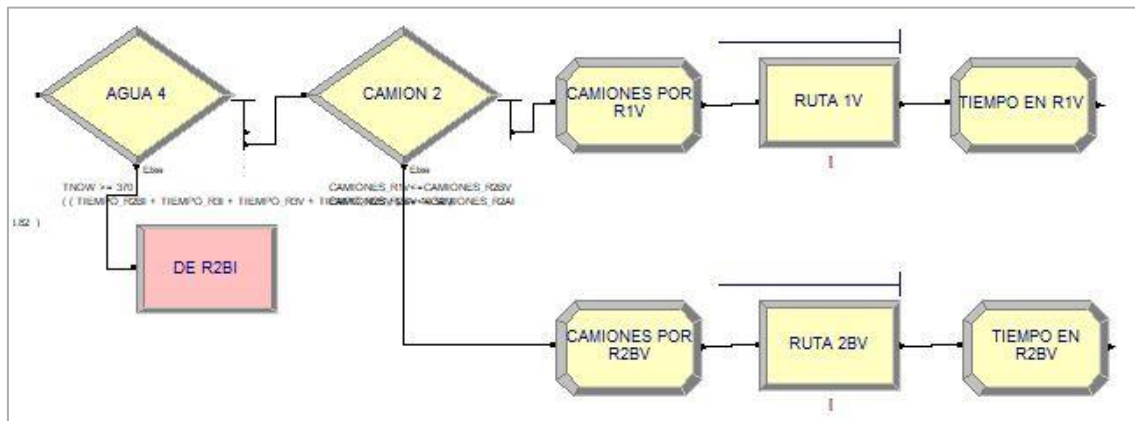


Figura 3.6. Elección en punto de intersección.

Por otro lado, cuando la decisión tomada es ir al punto de llenado, el módulo a utilizar para representar esta decisión es el Route.

Route es una modulo mediante el cual la entidad puede ser “transferida” hacia otro modulo. Además, dentro de esta se define el tiempo de transferencia, por lo que el tiempo de demora dependerá desde que ruta se esté mandando al camión a llenar.

En la figura 3.6 los módulos como “DE R2BI” provienen de diferentes rutas, por lo que el tiempo de transferencia difiere uno de otro. Sin embargo, todos los módulos tienen como destino el “Punto de llenado” para el cual se ocupa el módulo station.

3.6 Escenarios de Simulación

Ya con los modelos de simulación definidos, se comienza a probar diferentes escenarios para cada uno de ellos. Estos consisten principalmente en la utilización de flotas de diferentes tamaños y la ubicación de un nuevo punto de llenado.

3.6.1 Simulación 4 camiones modelo MTT13

Para la situación inicial se tiene que la flota que se encarga de regar los caminos de la mina está compuesta por 4 camiones con capacidad de 49000 L. Según lo simulado, un camión selecciona el sector 1, un camión el sector 2 y dos camiones el sector 3. De esta manera, los camiones riegan el sector elegido y se abastecen en el punto de llenado correspondiente. Luego de los 480 minutos de simulación se obtiene información de la cantidad de veces que pasa cada camión por las respectivas rutas.

En la tabla 3.8 se registra el número de veces que el camión o los camiones pasaron por cada ruta, además del tiempo entre riego.

Tabla 3.8. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio de riego por camino. Caso 4 aljibes.

| N° Ruta | IDA | | VUELTA | |
|---------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | N° recorridos | T entre riego [min] | N° recorridos | T entre riego [min] |
| Ruta 1 | 4 | 120 | 5 | 96 |
| Ruta 2 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 3 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 4 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 5 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 6 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 7 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 8 | 6 | 80 | 6 | 80 |
| Ruta 9 | 6 | 80 | 6 | 80 |

En la tabla 3.9 se presenta la situación de los puntos de llenado, donde el punto de llenado 3, correspondiente al sector 3, ha sido el más utilizado.

Tabla 3.9. Utilización de los puntos de llenado y tiempos de espera en cada uno. Caso 4 aljibes.

| Punto de llenado | N° de llenados | Tiempo de espera acumulado | Tiempo de espera promedio | Tiempo de espera máx. |
|--------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Punto de llenado 1 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| Punto de llenado 2 | 16 | 0 | 0 | 0 |
| Punto de llenado 3 | 29 | 53.6 | 3.7 | 8.5 |

Al solo contar con un camión recorriendo el sector 1 y 2, no se presentan tiempos de espera en el punto de llenado, a diferencia del punto de llenado 3, en el cual en varias ocasiones un camión tuvo que esperar para poder llenar su estanque.

Los tiempos que demora el camión en ir al punto de llenado o que tarda en llegar a la ruta que quiere llegar también supone una “perdida” en cuanto a la utilización del aljibe, sin embargo, son necesarios para cumplir con el objetivo.

Tabla 3.10. Tiempo de viaje del camión aljibe a puntos de llenado y a las distintas rutas. Caso 4 aljibes.

| Sector | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|----------|------------------------------|--------------------------|
| Sector 1 | 65.9 | 44.4 |
| Sector 2 | 48.7 | 49.3 |
| Sector 3 | 37.2 | 39.2 |

En la tabla 3.10 se muestra el tiempo que ocupó cada camión en total para desplazarse hasta el punto de llenado y también el tiempo acumulado de los viajes de cada camión a las distintas rutas del sector regado.

Considerando los datos mostrados en las tablas anteriores, se obtiene que el gasto de agua con 4 camiones aljibes es de 1,936,385 L en un turno.

3.6.2 Simulación 5 camiones modelo MTT13

El primer caso alternativo contempla 5 camiones aljibes con capacidad de 49,000L. De estos, un camión selecciona el sector 1, dos el sector 2 y dos el sector 3.

Tanto en el sector 1 como en el 3 el número de camiones se mantiene respecto al primer caso de simulación. En el sector 2 aumenta en una unidad la cantidad de camiones lo que trae consigo un aumento en el número de pasadas por ruta y una disminución en el tiempo entre regados.

Tabla 3.11. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio de riego por ruta. Caso 5 aljibes.

| | IDA | | VUELTA | |
|--------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | N° recorridos | T entre riego [min] | N° recorridos | T entre riego [min] |
| Ruta 1 | 4 | 120 | 5 | 96 |
| Ruta 2 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 3 | 5 | 96 | 5 | 96 |
| Ruta 4 | 7 | 69 | 7 | 69 |
| Ruta 5 | 8 | 60 | 7 | 69 |
| Ruta 6 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 7 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 8 | 6 | 80 | 6 | 80 |
| Ruta 9 | 6 | 80 | 6 | 80 |

Por otro lado, la utilización del punto de llenado 2 también aumenta pasando de 16 a 30, lo que también trae consigo tiempos de espera en los llenados.

Tabla 3.12. Utilización de los puntos de llenado y tiempos de espera en cada uno. Caso 5 aljibes.

| Punto de llenado | N° de llenados | Tiempo de espera acumulado | Tiempo de espera promedio | Tiempo de espera máx. |
|--------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Punto de llenado 1 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| Punto de llenado 2 | 30 | 27.2 | 1.8 | 10.6 |
| Punto de llenado 3 | 29 | 53.6 | 3.7 | 8.5 |

Respecto a los tiempos de viaje, en la tabla 3.13 se aprecia un aumento de estos en el sector 2. Si bien el programa no entrega información más específica respecto a esto, se entiende que al aumentar el número de camiones hay un cambio en cómo se distribuye cada camión para regar las rutas y también en donde tomará la decisión de dirigirse al punto de llenado, lo que sí podría sugerir mayores distancias o más viajes al punto de llenado, así también podría significar la elección de regar rutas más alejadas luego de llenar el tanque.

Tabla 3.13. Tiempo de viaje del camiónaljibe a puntos de llenado y a las distintas rutas. Caso 5 aljibes.

| Sector | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|----------|------------------------------|--------------------------|
| Sector 1 | 65.9 | 44.4 |
| Sector 2 | 61.4 | 58.1 |
| Sector 3 | 37.2 | 39.2 |

Según estos datos y considerando el aumento en el uso del punto de llenado, el gasto de agua asciende a 2,225,662 L en un turno.

3.6.3 Simulación 6 camiones modelo MTT13

La tercera situación contempla 6 camiones de 49000 L, los cuales se distribuyen de forma equitativa, quedando a disposición de cada sector 2 camiones aljibes.

Como el único sector que aumenta la cantidad de camiones es el sector 1, es también el único que presenta cambios en cuando a número de veces que pasa el camión y el tiempo entre regados. En la tabla 3.14 se aprecian los nuevos valores para estos.

Tabla 3.14. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio entre riegos por ruta. Caso 6 aljibes.

| | IDA | | VUELTA | |
|--------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | N° recorridos | T entre riego [min] | N° recorridos | T entre riego [min] |
| Ruta 1 | 8 | 60 | 9 | 53 |
| Ruta 2 | 9 | 53 | 9 | 53 |
| Ruta 3 | 9 | 53 | 9 | 53 |
| Ruta 4 | 7 | 69 | 7 | 69 |
| Ruta 5 | 8 | 60 | 7 | 69 |
| Ruta 6 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 7 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 8 | 6 | 80 | 6 | 80 |
| Ruta 9 | 6 | 80 | 6 | 80 |

Con 6 camiones el punto de llenado 1 aumenta de 12 a 24 el número de veces que es utilizado, lo que supone la aparición de tiempos de espera en ciertas ocasiones.

Tabla 3.15. Utilización de los puntos de llenado y tiempos de espera en cada uno. Caso 6 aljibes.

| Punto de llenado | N° de llenados | Tiempo de espera acumulado | Tiempo de espera promedio | Tiempo de espera máx. |
|--------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Punto de llenado 1 | 24 | 33.1 | 2.7 | 10.9 |
| Punto de llenado 2 | 30 | 27.2 | 1.8 | 10.6 |
| Punto de llenado 3 | 29 | 53.6 | 3.7 | 8.5 |

A diferencia del caso del sector 2, se aprecia una disminución de los tiempos de viaje de los camiones del sector 1. Como se mencionaba en el apartado anterior, la situación y distribución del trabajo de cada camión se ve afectada por el aumento de estos, lo que puede significar que las decisiones se toman bajo otras condiciones. Así, los tiempos asociados a los viajes que realiza el camión al punto de llenado o a regar otras rutas pueden verse afectados sin una tendencia clara, aumentando o disminuyendo según sea el caso.

Tabla 3.16. Tiempo de viaje del camión aljibe a puntos de llenado y a las distintas rutas. Caso 6 aljibes.

| Sector | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|----------|------------------------------|--------------------------|
| Sector 1 | 60 | 40.7 |
| Sector 2 | 61.4 | 58.1 |
| Sector 3 | 37.2 | 39.2 |

La cantidad de agua que se ocupa en este caso aumenta a 2,615,301 L por turno.

3.6.4 Simulación 7 camiones modelo MTT13

Para este caso se utilizan 7 camiones con las mismas características ya presentadas. Estos se distribuyen en los sectores obteniendo dos camiones aljibes para el sector 1, dos para el sector 2 y tres camiones para el sector 3.

El séptimo camión agregado a la simulación selecciona el sector 3 para trabajar. En la tabla 3.17 se puede ver que esto supuso un aumento en la cantidad de riegos, principalmente en la ruta 8, con respecto a los casos anteriores.

Tabla 3.17. Número de veces que pasa un camión y tiempo promedio entre riego por ruta. Caso 7 aljibes.

| | IDA | | VUELTA | |
|--------|---------------|---------------------|---------------|---------------------|
| | N° recorridos | T entre riego [min] | N° recorridos | T entre riego [min] |
| Ruta 1 | 8 | 60 | 9 | 53 |
| Ruta 2 | 9 | 53 | 9 | 53 |
| Ruta 3 | 9 | 53 | 9 | 53 |
| Ruta 4 | 7 | 69 | 7 | 69 |
| Ruta 5 | 8 | 60 | 7 | 69 |
| Ruta 6 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 7 | 6 | 80 | 7 | 69 |
| Ruta 8 | 7 | 69 | 7 | 69 |
| Ruta 9 | 6 | 80 | 6 | 80 |

El tiempo de espera en el punto de llenado 3 aumenta significativamente con respecto a los otros casos.

Tabla 3.18. Utilización de los puntos de llenado y tiempo de espera en cada uno. Caso 7 aljibes.

| Punto de llenado | N° de llenados | Tiempo de espera acumulado | Tiempo de espera promedio | Tiempo de espera máx. |
|--------------------|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Punto de llenado 1 | 24 | 33.1 | 2.7 | 10.9 |
| Punto de llenado 2 | 30 | 27.2 | 1.8 | 10.6 |
| Punto de llenado 3 | 30 | 149.8 | 14.9 | 18.5 |

Los tiempos de viaje por camión del sector 3 disminuyen debido que los camiones de este sector están yendo solo 10 veces en promedio al punto de llenado.

Tabla 3.19. Tiempo de viaje del camión aljibe a puntos de llenado y a las distintas rutas. Caso 7 aljibes.

| Sector | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|----------|------------------------------|--------------------------|
| Sector 1 | 60 | 40.7 |
| Sector 2 | 61.4 | 58.1 |
| Sector 3 | 26.1 | 32.9 |

La cantidad de agua ocupada en el escenario de 7 camiones aljibes es de 2,650,723 L.

3.6.5 Simulación con punto de llenado extra

Además del número de camiones, la opción de modificar la cantidad de puntos de llenado también debe ser evaluada. El tiempo de espera que se produce en estos sectores es un factor que contribuye a no lograr mayor número de regados por camino, por lo que modificando esto se podría obtener un mejor desempeño del camión aljibe.

Se decide evaluar la ubicación de un punto de llenado más en los sectores 2 y 3. El sector 3 es el que presenta los mayores tiempos de espera acumulados, incluso cuando en los otros sectores se mueve

el mismo número de camiones, es por esto por lo que se decide evaluar la opción y ver cómo se comporta la distribución y el desempeño de los camiones en este caso. Por otro lado, si bien el sector dos tiene un tiempo de espera acumulado un poco menor que el sector 1, el sector 1 tiene intervalos más pequeños entre regados que el sector 2. Hay caminos del sector 1 que se han regado hasta 3 veces más que los del sector 2 y esto es un aspecto importante para este trabajo.

Es importante notar que, en este caso, un nuevo punto de llenado no implica una nueva fuente de agua ni su ubicación en otro sector de la mina, si no que se considera como si se ubicara una nueva tubería en el mismo sector en el que se encuentra la primera y, por lo tanto, ligada también a la misma fuente de agua ya existente.

A continuación, se presentan las tablas comparativas de cada sector donde se aprecia la diferencia entre tener un solo punto de llenado y tener dos.

Sector 2

En el sector 2 ha aumentado el número de veces que se riega la Ruta 4 ida, Ruta 5 vuelta y la Ruta 6 ida, además no hay tiempos de espera en los puntos de llenado.

Tabla 3.20. Comparativa del número de regados y llenados en el sector dos con uno y dos puntos de llenado.

| | 1 punto de llenado | 2 puntos de llenado |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Ruta o Punto de llenado | N° de regados/llenados | N° de regados/llenados |
| Ruta 4 Ida | 7 | 8 |
| Ruta 4 Vuelta | 7 | 7 |
| Ruta 5 Ida | 8 | 8 |
| Ruta 5 Vuelta | 7 | 8 |
| Ruta 6 Ida | 6 | 7 |
| Ruta 6 Vuelta | 7 | 7 |
| Punto de llenado 1 | 30 | 16 |
| Punto de llenado 2 | - | 16 |

Para el tiempo de viaje a punto de llenado se nota un pequeño aumento con respecto a la situación con un punto de llenado, esto se explica con el aumento del número de veces que los camiones fueron a llenar su tanque.

Tabla 3.21. Comparativa tiempos de viaje del camión con uno y dos puntos de llenado.

| | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------|
| 1 punto de llenado | 61.4 | 58.1 |
| 2 puntos de llenado | 63.4 | 19.8 |

Sector 3

Para el sector 3, el aumento de un punto de llenado supone la mejor situación en cuanto a cantidad de veces que un camino ha sido regado, obteniendo 7 pasadas por camino a excepción de la ruta 7 ida.

Tabla 3.22. Comparativa de número de regados y llenados en el sector 3 con uno y dos puntos de llenado.

| | 1 punto de llenado | 2 puntos de llenado |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Ruta o Punto de llenado | N° de regados/llenados | N° de regados/llenados |
| Ruta 7 Ida | 6 | 6 |
| Ruta 7 Vuelta | 7 | 7 |
| Ruta 8 Ida | 6 | 7 |
| Ruta 8 Vuelta | 6 | 7 |
| Ruta 9 Ida | 6 | 7 |
| Ruta 9 Vuelta | 6 | 7 |
| Punto de llenado 1 | 29 | 17 |
| Punto de llenado 2 | - | 16 |

Con respecto a los tiempos de viajes en el sector 3, estos aumentan de forma leve. Esto se debe a que cada camión realiza entre uno o dos viajes más al punto de llenado y han realizado un regado más en 4 rutas del sector.

Tabla 3.23. Comparativa tiempos de viaje del camión con uno y dos llenados.

| N° de puntos de llenado | Tiempo viaje a punto llenado | Tiempo acumulado a rutas |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 1 punto de llenado | 37.2 | 39.2 |
| 2 puntos de llenado | 42.5 | 43.3 |

4 RESULTADOS

Se presentan los resultados del trabajo mediante la evaluación y comparación de los distintos escenarios de simulación.

El tiempo que transcurre entre un riego y otro en una misma ruta es importante para lograr un buen control del polvo. En los gráficos que se presentan a continuación se hace una comparación de estos considerando los diferentes escenarios que se simulan en Arena.

Para el sector 1 se observa un tiempo muy elevado entre riegos en los escenarios con 4 y 5 camiones, ya que bajo estas condiciones solo se destina un camión a este sector. Esto cambia en los siguientes dos escenarios disminuyendo considerablemente el tiempo y favoreciendo una frecuencia de riego mayor. Este cambio se debe a que en los últimos dos escenarios el sector 1 cuenta con dos camiones disponibles.

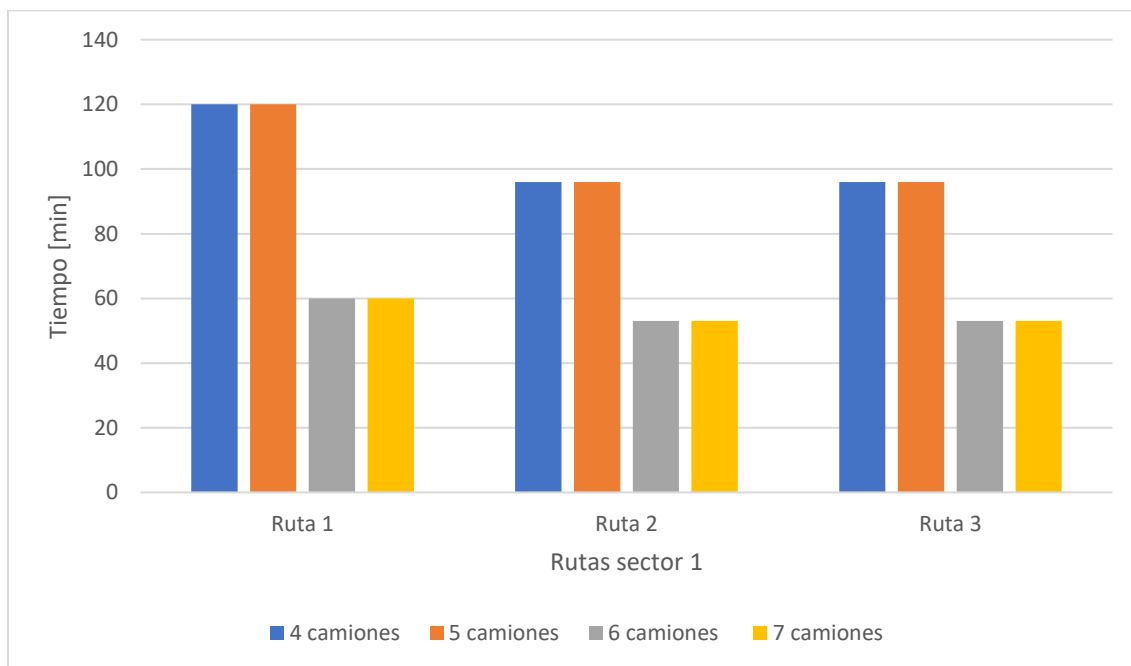


Figura 4.1. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 1 para cada escenario.

La ruta 1 pasa de ser regada entre 4 y 5 veces a ser regada 9 veces gracias al aumento de un camión más en el sector. Esto también supone un aumento en los tiempos de espera en el sector de llenado.

Considerando los valores de la tabla 3.6, se puede decir que en el sector 1 los casos de 6 y 7 camiones son los que están más cerca de cumplirlos.

Cuando se utilizan 4 camiones en el sector dos, todas sus rutas presentan bajas frecuencias de riego alcanzando casi 100 minutos entre un riego y otro. Cuando se evalúa el caso con 5 camiones, quedan dos camiones a disposición de este sector aumentando la frecuencia de regado. Debido a que el número de camiones se mantiene para los otros casos, la frecuencia del paso de los camiones también lo hace.

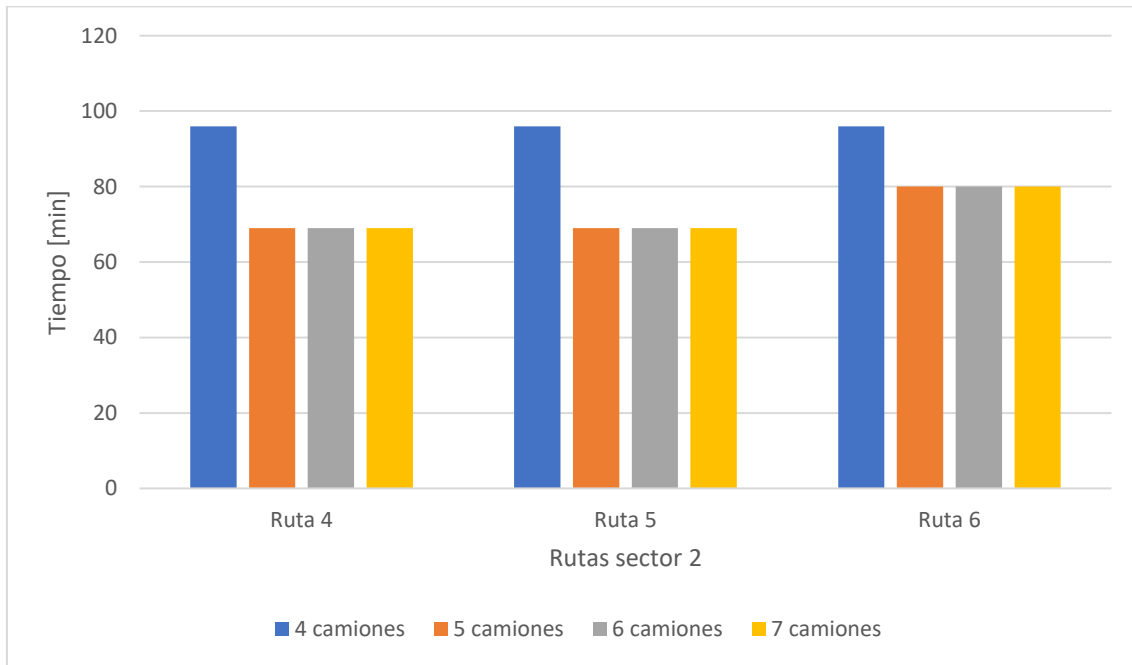


Figura 4.2. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 2 para cada escenario.

En cuanto a los tiempos entre riegos calculados con la tasa de evaporación, en todos los casos las rutas del sector dos se encuentran bajo el valor determinado con la temperatura mínima y se encuentran por sobre el valor calculado con la temperatura máxima, sin embargo, los casos de 5, 6 y 7 camiones son en los que están más cerca de cumplirlos.

El sector 3 cuenta con dos camiones en los primeros tres escenarios y dispone de tres para el caso con 7 camiones. Como se observa en la figura 4.3, los tiempos son muy parecidos en todos los escenarios y solo se observa un cambio en el último caso de la ruta 8 donde aumenta la frecuencia del paso de los camiones.

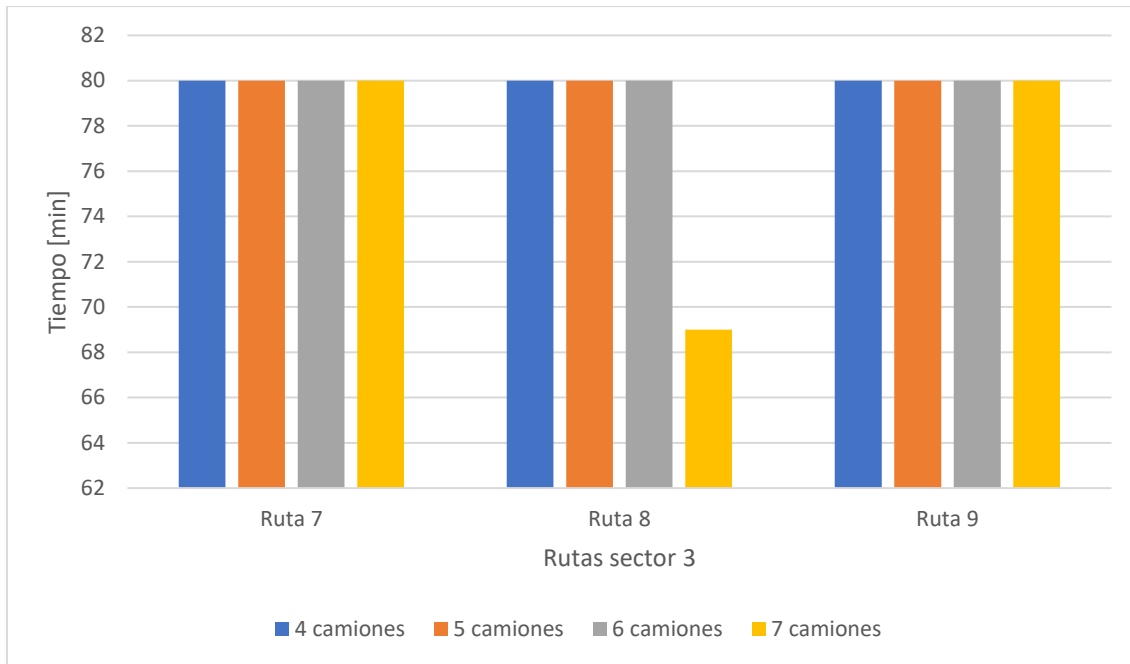


Figura 4.3. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 3 para cada escenario.

El aumento en el número de camiones en el sector 1 y 2 los beneficia disminuyendo de 60 a 20 minutos el tiempo entre que riega un camión y otro. Sin embargo, en el sector 3, el aumento de su flota a un tercer camión no implica grandes cambios en la frecuencia de riego y por el contrario se generan mayores tiempos de espera en los puntos de llenado.

Dando cuenta de los tiempos de espera que se generan en los puntos de llenado, es que se considera la utilización de un punto de llenado extra como otro escenario para la simulación. Este escenario se simula considerando 6 camiones regando los caminos y aplica para el sector 2 y sector 3.

Los resultados del sector 2 con un punto de llenado más, observados en la figura 4.4 muestran la ruta 4 sin variación, la ruta 5 con una variación de 9 minutos menos y la ruta 6 con un aumento en la frecuencia de riego más notoria.

Es importante destacar que en el caso de la ruta 6, solo en una dirección alcanza los 80 minutos entre riegos cuando hay un solo punto de llenado, en la otra dirección la frecuencia es de cada 69 minutos al igual que en el resto de las rutas. Por lo que no se aprecia una gran diferencia con la ubicación de un punto de llenado más.

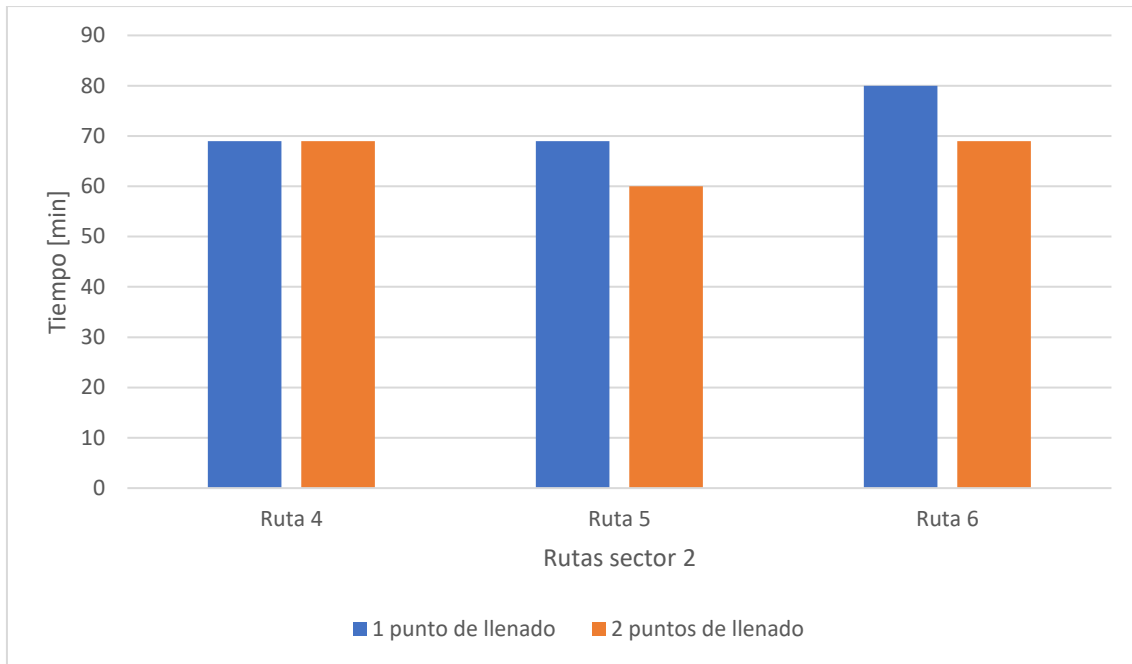


Figura 4.4. Gráfico tiempos entre riegos del sector 2 versus la cantidad de puntos de llenado.

Por otro lado, en la figura 4.5 se observan los resultados para el sector 3, cuyos caminos han aumentado su frecuencia de regado de forma pareja disminuyendo en de 11 minutos el paso entre un camión y otro.

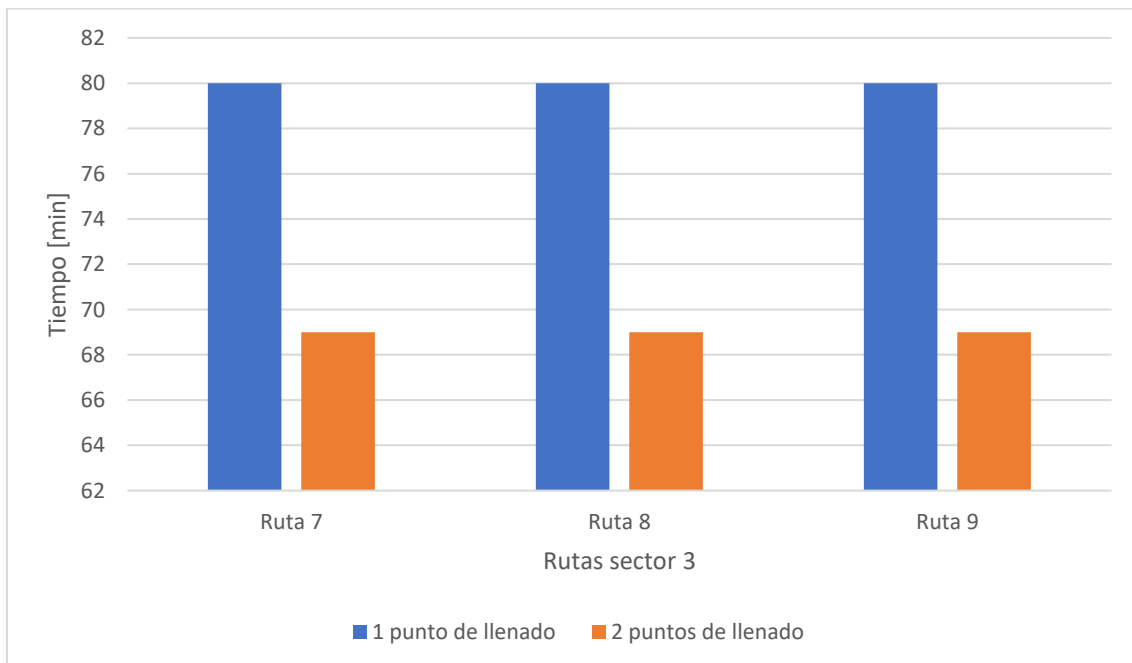


Figura 4.5. Gráfico Tiempo entre riegos del sector 3 versus cantidad de puntos de llenado.

Si bien, el tiempo de riego entre un camión y otro disminuyó 11 minutos al igual que en la ruta 6 del sector 2, el sector 3 se ve más beneficiado ya que en sus tres rutas la frecuencia de riego es de 80 minutos, lo cual es bastante alto ya que se encuentra alejado de los valores de “Tiempo 2” en la tabla 3.6. Por lo que, la ubicación de un punto de llenado extra en el sector 3 tiene buenos resultados.

Junto con el aumento en la cantidad de veces que pasa un camión por la misma ruta o el número de camiones que se tiene trabajando, la cantidad de veces que los puntos de llenado son utilizados también aumenta. La principal implicancia que tiene esto es que hay un aumento en la cantidad de agua que se utiliza para regar. En la situación original de este trabajo, o sea con 4 camiones recorriendo los caminos, se ocupan 1,936,385 L en 8 horas de trabajo. Esta cifra aumenta al considerar otros escenarios, donde el que posee un más alto consumo es el caso de 6 camiones con punto de llenado extra en el sector 2 con 2,845,542 L en 8 horas de trabajo.

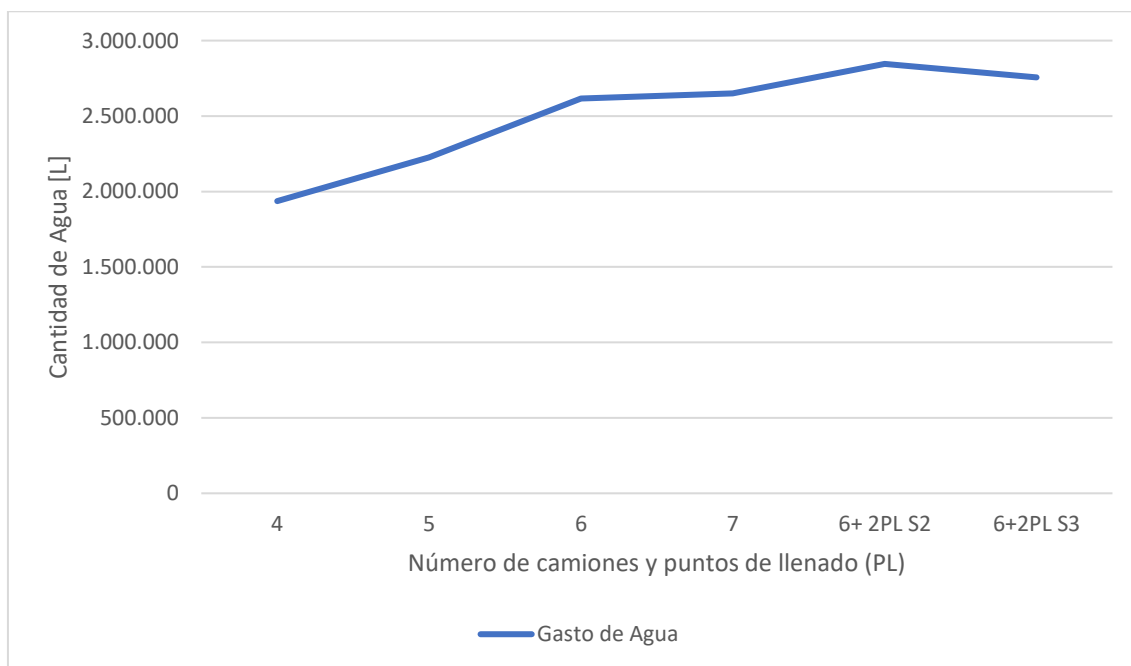


Figura 4.6. Gráfico gasto de agua en los distintos escenarios de simulación.

En la figura 4.6 se muestra cómo se comporta el gasto de agua en relación con el número de camiones y a la cantidad de puntos de llenado disponible.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La simulación con el software Arena permite situarnos en distintos casos y evaluar de buena manera las variables y como estas afectan a los resultados de estos escenarios. Para este trabajo, el software de simulación permite mostrar la situación actual de una mina a cielo abierto y su flota de aljibes compuesta por 4 camiones de 49,000 L. Mediante los resultados de este trabajo se ha podido dar cuenta que esta flota no da abasto a las necesidades que tienen los caminos y en consecuencia no logra un buen control del polvo.

Al comparar los escenarios que contemplan 5, 6 y 7 camiones se aprecia una mejora en la frecuencia de regado, sin embargo, también se ve como al aumentar los camiones, los tiempos de espera en puntos de llenado también aumentan. Es por esto por lo que es necesario buscar un equilibrio entre lo que es un aumento de número de camiones y los puntos de llenado disponible.

Dentro de las opciones que se consideran como alternativa a la flota actual, el caso de 6 camiones aljibes es el que mejor se adapta, ya que en el escenario de 5 camiones el sector 1 queda con tiempos sin riego muy prolongados y totalmente fuera de los márgenes impuestos con anterioridad y en el caso con 7 camiones, los tiempos de espera aumentan bastante y no implica un aumento significativo en la cantidad de veces que son regados los caminos del sector 3.

Siendo este último el sector que tiene una menor frecuencia de riego, se decide ubicar un segundo punto de llenado. Esto tiene resultados positivos y da cuenta de que los factores como el tiempo de espera si perjudican el rendimiento del camión aljibe disminuyendo la cantidad de veces que recorre los caminos del sector. Otro factor que influye en la frecuencia de riego es el tiempo que el camión ocupa en viajar de un lugar a otro, siendo la distancia que el camión tiene que recorrer inicialmente para llegar a cada sector parcialmente responsable de que el sector 1 tenga más recorridos por ruta al poder iniciar primero los riegos en estas.

Respecto a los tiempos entre regados que se deben cumplir, se nota que en ningún camino se alcanza el tiempo entre riegos cuando se está a temperatura máxima, pero la mayoría se encuentra por debajo del tiempo máximo entre riegos asociado a la temperatura más baja. Considerando que durante el día la temperatura varia, la eficiencia en el control del polvo también varia, pudiendo ser

más sencillo y lograrlo de mejor forma durante los periodos en que las temperaturas no sean tan altas, y siendo un poco más difícil en aquellos horarios de más calor.

Si bien los resultados indican que para un mejor control del polvo es necesario aumentar la flota de camiones aljibes, hay que considerar que existen costos asociados a esto, tales como la inversión que se hace al comprar los camiones o instalar un punto de llenado nuevo, costos operacionales como gasto de gasolina, operadores y mantención de equipos, los cuales pueden ser hasta un 50% mayor que en la actualidad. Por otro lado, hay variables como las emisiones de CO₂ que también se ven afectadas aumentando junto a una mayor presencia de camiones, además del mayor gasto de agua que supone aumentar el riego en los caminos. Al tener algunas limitaciones al momento de llevar a cabo el trabajo, quedan muchas aristas o puntos importantes fuera de evaluación por lo que para tomar una decisión certera y bien fundada en el futuro o en otros estudios similares se recomienda considerar estos factores y hacer una evaluación en base a ellos.

También se recomienda evaluar esta situación con otros tipos de supresores, ya que estos al tener un tiempo de duración mayor, pueden hacer la diferencia al momento de decidir agrandar la flota de camiones.

Por otro lado, realizar una evaluación que involucre los doce meses del año permitiría considerar los momentos en que la situación climática es diferente y que por lo tanto la actividad de los camiones aljibes se ve afectada.

6 BIBLIOGRAFIA

1. **A. Gonzalez, D. Aitken, C. Heitzer, C. Lopez, M. Gonzales.** *Reducing Mine Water use in arid areas through the use of a byproduct road suppressant.* 2019.
2. **World Weather Online.** World Weather Online. [En línea] 2022. <https://www.worldweatheronline.com/lo-barnechea-weather-averages/region-metropolitana/cl.aspx>.
3. **Ministerio del Medio Ambiente.** Planes de descontaminación atmosférica - Conceptos de calidad del aire. [En línea] <https://ppda.mma.gob.cl/conceptos-de-calidad-del-aire/>.
4. —. *Guía de calidad del aire y educación ambiental.* 2016.
5. **Instituto Nacional de Ecología de México.** *Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM 2.5.* 2011.
6. **Tapia, Daniel.** Revista Nueva Minería. [En línea] 01 de Mayo de 2019. <https://www.nuevamineria.com/revista/control-de-polvo-las-soluciones-que-se-aplican-en-mineria/>.
7. **Jaman, Ramón Rada.** Portal Minero. [En línea] Mayo de 2013. <https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=75877119>.
8. **C.Egas, P. I. Naulin, M. Préndes.** *Contaminación urbana por material particulado y su efecto sobre las características morfo-anatómicas de cuatro especies arbóreas de Santiago de Chile.* 2018.
9. **COCHILCO.** *Consumo de Agua en la Minería del Cobre al 2018.* 2019.
10. *Control del Polvo en Minería: Tecnología, Seguridad y Eficiencia.* **Revista Construcción Minera.** 2014.
11. **Minera Nittetsu.** *Proyecto Explotación Minera Sol Naciente.* 2016.
12. **Anzeve.** Anzeve Spraystream. [En línea] <https://www.anzeve.com/marcas/spraystream/>.
13. **MegaCorp.** *Manual del Operador.* 2013.
14. —. *Mega rigid frame truck tank CATERPILLAR.* 2019.

15. **Taswater.** Safe filling procedure from this water filling station. [En línea]
<http://www.enquiries.taswater.com.au>.
16. **Trufflo pumping systems.** Water Truck Fill Point - Stand Pipe. [En línea]
<https://truflopumps.com.au/>.
17. **Shannon, R. E.** *La simulación de los sistemas.* 1975.
18. **Hidalgo, T.** *Analisis comparativo de software para simulación en minería subterránea.* 2017.
19. **Rockwell Automation.** Arena Simulation Software. [En línea]
<https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/arena-simulation.html>.
20. **A. Manzur, J. Cardoso.** *Velocidad de evaporación del agua.* s.l. : Revista Mexicana de Fisica, 2015.
21. **S., Wooding.** Evaporation Rate Calculator. *Omnicalculator.* [En línea] 2024.
<https://www.omnicalculator.com/physics/evaporation-rate#how-to-calculate-evaporation-rate>.
22. **Caterpillar.** Muldenkipper 773D.

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A: Precursores para la formación de contaminantes secundarios

Los principales gases precursores de las partículas son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco (NH₃), los cuales forman partículas de sulfatos y nitratos principalmente, así como partículas suspendidas secundarias orgánicas derivadas de la oxidación fotoquímica de los compuestos orgánicos [5].

Tabla 7.1. Contaminantes primarios y secundarios.

| Contaminantes primarios | Contaminantes Secundarios |
|--|----------------------------------|
| Óxidos de Carbono (CO) | O ₃ (troposférico) |
| Compuestos nitrogenados (NO _x , NH ₃ , N ₂ O) | Hidrocarburos oxidados |
| Compuestos azufrados (SO _x , SO ₂) | Aerosoles orgánicos secundarios |
| Material particulado (MP ₁₀ , MP _{2.5}) | Sulfatos |
| Hidrocarburos | Nitratos |
| Metales | Material particulado secundario. |

7.2 ANEXO B: Bomba de agua

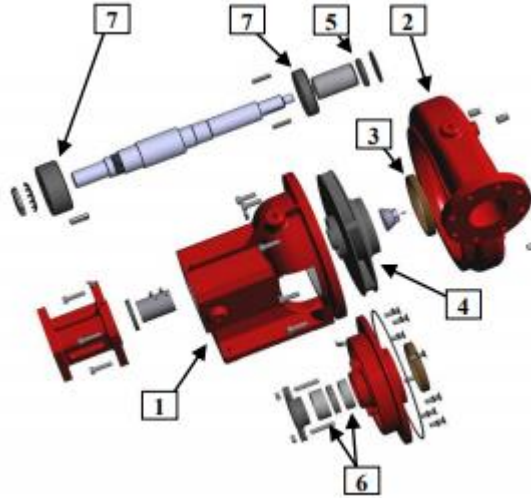


Figura 7.1. Partes de la bomba de agua [13].

1. Soporte: es el bastidor principal de la bomba que permite empernarla al camión aljibe y sirve para montar directamente el motor de mando hidráulico.
2. Caja tipo voluta: es una caja con forma de caparazón de caracol que aloja el impelente. Es angosta en el centro y se ensancha hacia el área de descarga.
3. Anillo de desgaste: actúa como superficie de contacto entre el impelente y la caja tipo voluta. Este fabricado de bronce.
4. Impelente: es una rueda giratoria sujeta al eje que aumenta la velocidad del agua, generando flujo y presión de agua.
5. Sello de eje: confina la grasa a las áreas de contacto interna y externa, evita que materiales extraños ingresen en el área de contacto y encierra el agua dentro de la caja tipo voluta.
6. Sello tipo cuerda: sella la circunferencia del eje giratorio de la bomba en la caja tipo voluta. Está fabricado de un material de grafito especial tipo cuerda y su diseño permite el goteo del agua y la lubricación del eje.
7. Cojinetes superiores e inferiores: conforman una superficie de rodillo para el eje de la bomba.

7.3 ANEXO C: Sistema de rociado

Alcance de rociado

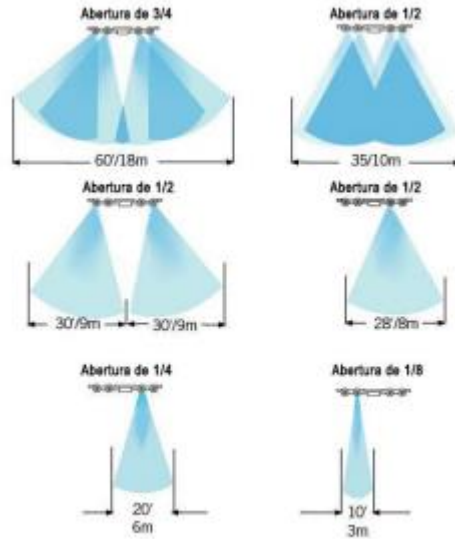


Figura 7.2. Largo y ancho de riego según número de rociadores y abertura de estos [13].

Rendimiento del sistema rociador

Rendimiento estándar de rociado del vehículo en función de la cobertura del deflector de la cabeza rociadora, la velocidad del vehículo y un volumen de líquido de 20000 galones.

Tabla 7.2. Rendimiento estándar del vehículo [13].

| Cantidad de cabezas rociadoras y medida de la abertura | Gpm/litros | Velocidad de avance (mph/km/h) | Distancia máxima (millas/km) |
|--|------------|--------------------------------|------------------------------|
| 2 cabezas rociadoras a 1/4" | 954/3611 | 10/16 | 3.5/5.6 |
| 2 cabezas rociadoras a 1/4" | 954/3611 | 15/24 | 5.2/8.3 |
| 2 cabezas rociadoras a 3/8" | 1243/4705 | 10/16 | 2.7/4.3 |
| 2 cabezas rociadoras a 3/8" | 1243/4705 | 15/24 | 4.0/6.4 |
| 4 cabezas rociadoras a 1/4" | 1504/5693 | 10/16 | 2.2/3.5 |

| | | | |
|-----------------------------|-----------|-------|---------|
| 4 cabezas rociadoras a ¼" | 1504/5693 | 15/24 | 3.3/5.3 |
| 4 cabezas rociadoras a 3/8" | 1572/5950 | 10/16 | 2.1/3.3 |
| 4 cabezas rociadoras a 3/8" | 1572/5950 | 15/24 | 3.2/5.1 |

Riego de precisión

cálculos de riego de precisión para el sistema rociador instalado. Cada tabla se clasifica según el tamaño de la abertura del deflector de la cabeza rociadora correspondiente al ancho de un abanico pleno para 2 o 4 rociadores.

Tabla 7.3. Riego de precisión para tanque de 49210 litros con abertura de 3/8" [13].

| Velocidad [Km/h] | 2 cabezas rociadoras | | | | 4 cabezas rociadoras | | | |
|------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| | Distancia de rociado [m] | Cobertura total [m ²] | Dispersión [L/m ²] | Capa de agua [mm] | Distancia de rociado [m] | Cobertura total [m ²] | Dispersión [L/m ²] | Capa de agua [mm] |
| 3 | 554 | 13304 | 3.699 | 3.68 | 438 | 8767 | 5.613 | 5.59 |
| 8 | 1402 | 33636 | 1.463 | 1.47 | 1108 | 22165 | 2.220 | 2.23 |
| 16 | 2803 | 67273 | 0.731 | 0.74 | 2217 | 44330 | 1.110 | 1.11 |
| 24 | 4205 | 100909 | 0.488 | 0.48 | 3325 | 66496 | 0.740 | 0.74 |

Tabla 7.4 Riego de precisión para tanque de 75708 litros con abertura de 3/8" [13].

| Velocidad [Km/h] | 2 cabezas rociadoras | | | | 4 cabezas rociadoras | | | |
|------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| | Distancia de rociado [m] | Cobertura total [m ²] | Dispersión [L/m ²] | Capa de agua [mm] | Distancia de rociado [m] | Cobertura total [m ²] | Dispersión [L/m ²] | Capa de agua [mm] |
| 3 | 853 | 20468 | 3.699 | 3.68 | 674 | 13487 | 5.613 | 5.59 |
| 8 | 2156 | 51749 | 1.4463 | 1.47 | 1705 | 34100 | 2.220 | 2.23 |
| 16 | 4312 | 103497 | 0.731 | 0.74 | 3410 | 68201 | 1.110 | 1.11 |
| 24 | 6469 | 155246 | 0.488 | 0.48 | 5115 | 102301 | 0.740 | 0.74 |

7.4 ANEXO D: Dimensiones tubería vertical

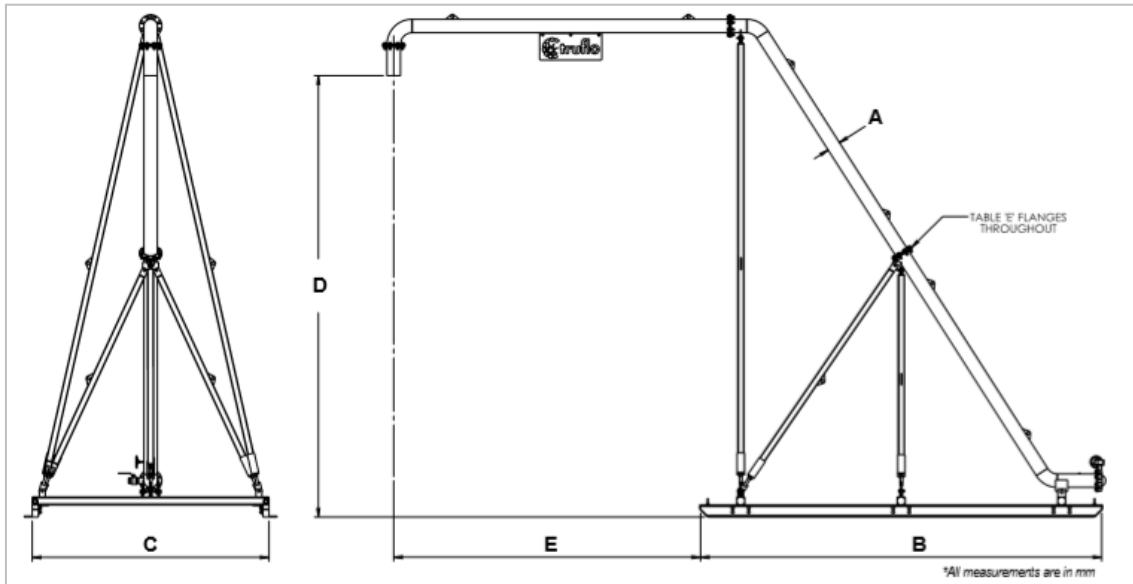


Figura 7.3. Dimensiones tuberías verticales [16].

Tabla 7.5. Dimensiones tuberías verticales [16].

| Item | A [mm] | B [mm] | C [mm] | D [mm] | E [mm] |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 100NB | 4000 | 2650 | 4692 | 2477 |
| 2 | 150NB | 5000 | 2950 | 5500 | 2825 |
| 3 | 200NB | 5000 | 2950 | 5900 | 3900 |
| 4 | 250NB | 6400 | 3535 | 8050 | 4525 |
| 5 | 300NB | 6400 | 3535 | 8050 | 4525 |
| 6 | 400NB | 6400 | 3535 | 8050 | 4525 |

7.5 ANEXO E: Curvas de velocidades para camión aljibe

Curvas de velocidades camiones aljibe [22].

Modelo CAT Caterpillar

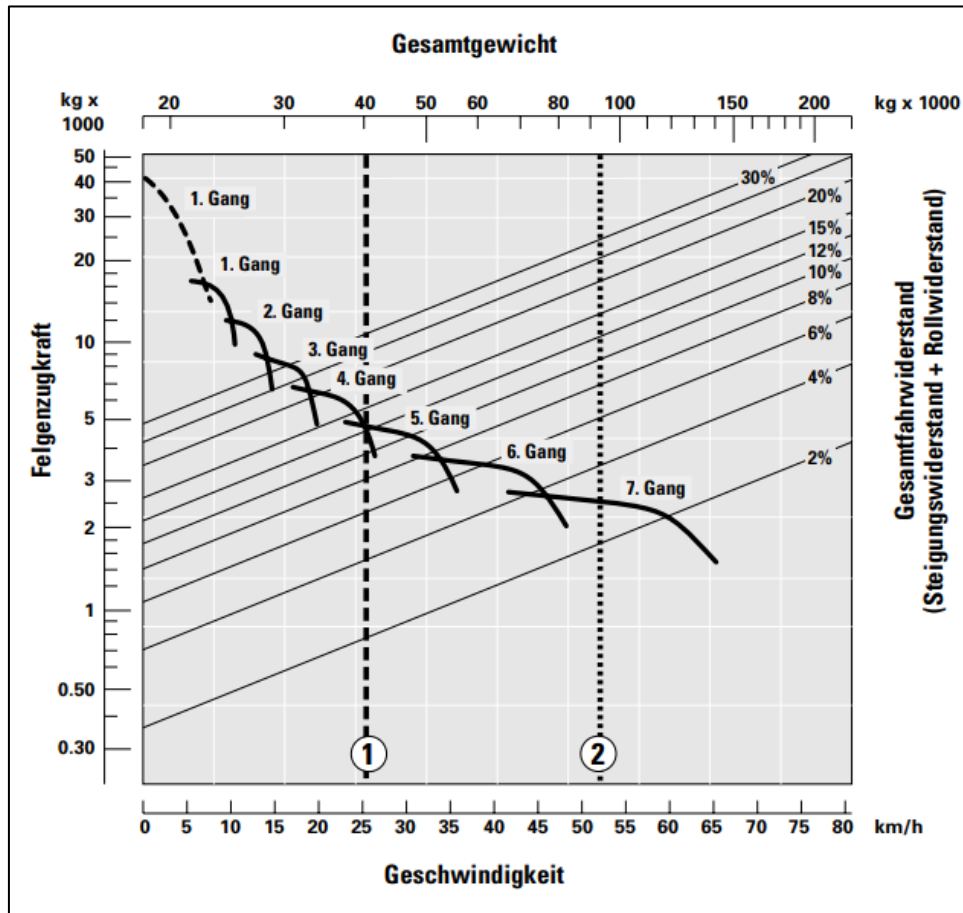


Figura 7.4. Curva de velocidad subida camión CAT [22].

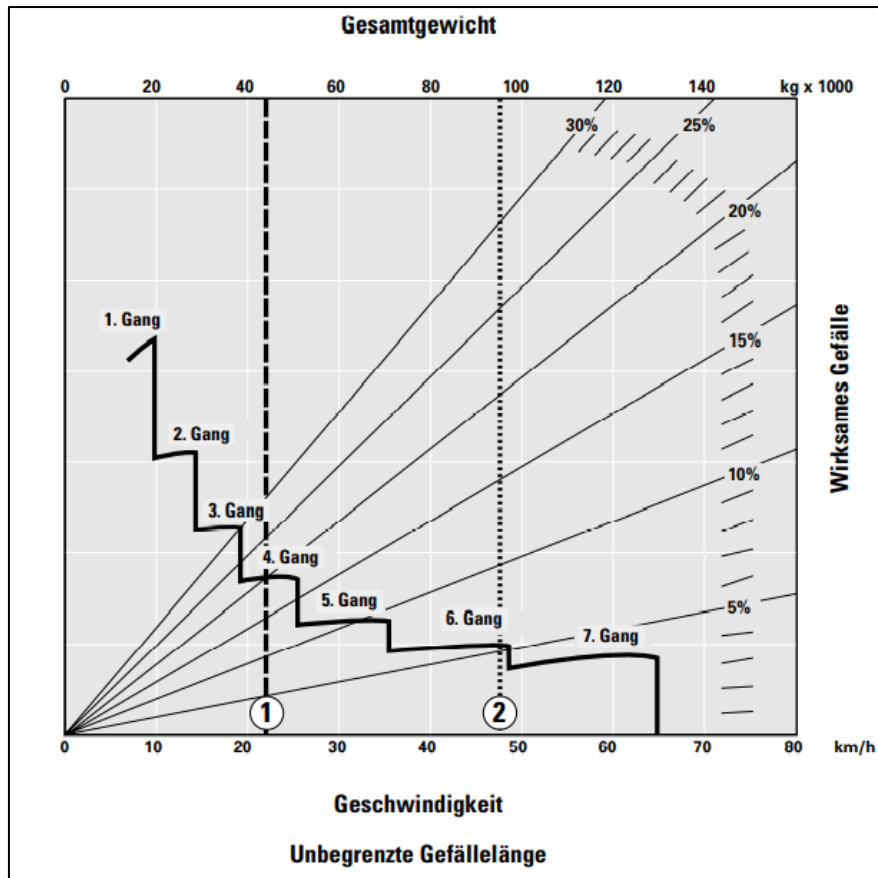


Figura 7.5. Curva de velocidad bajada camión CAT [22].

7.6 ANEXO F: Módulos y variables software Arena

Se presentan algunos otros módulos y elementos que son esenciales para la simulación.

Entidad: es el objeto, persona o elemento que recorre y se hace parte de la simulación. En este caso corresponde a los camiones. Puede haber más de una entidad por lo que la información de estos se almacena en la barra de procesos básicos. Este da la opción de agregar costos asociados a la entidad como se ve en la figura 7.6.

Figura 7.6. Ventana de edición entidad.

Variables: la definición de variables nos permite ingresar datos al modelo u obtener datos de él, además de ser un factor importante al momento del desarrollo y el buen funcionamiento de este.

| | Name | Comment | Rows | Columns | Data Type | Clear Option | File Name | Initial Values |
|----|---------------|---------|------|---------|-----------|--------------|-----------|----------------|
| 1 | CAMIONES_R1I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 2 | CAMIONES_R3I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 3 | CAMIONES_R1V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 4 | CAMIONES_R3V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 5 | CAMIONES_R2AI | | | | Real | System | | 0 rows |
| 6 | CAMIONES_R2AV | | | | Real | System | | 0 rows |
| 7 | CAMIONES_R2BI | | | | Real | System | | 0 rows |
| 8 | CAMIONES_R2BV | | | | Real | System | | 0 rows |
| 9 | TIEMPOS_RUTAS | | 3 | 3 | Real | System | | 9 rows |
| 10 | TIEMPO_R1I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 11 | TIEMPO_R3I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 12 | TIEMPO_R2AI | | | | Real | System | | 0 rows |
| 13 | TIEMPO_R2BI | | | | Real | System | | 0 rows |
| 14 | TIEMPO_R2AV | | | | Real | System | | 0 rows |
| 15 | TIEMPO_R2BV | | | | Real | System | | 0 rows |
| 16 | TIEMPO_R1V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 17 | TIEMPO_R3V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 18 | MINIMO | | | | Real | System | | 0 rows |

Figura 7.7. Variables utilizadas en la simulación sección 1.

| | Name | Comment | Rows | Columns | Data Type | Clear Option | File Name | Initial Values |
|----|---------------|---------|------|---------|-----------|--------------|-----------|----------------|
| 1 | CAMIONES_R5I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 2 | CAMIONES_R6I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 3 | CAMIONES_R4I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 4 | CAMIONES_R5V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 5 | CAMIONES_R6V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 6 | CAMIONES_R4V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 7 | TIEMPOS_RUTAS | | 3 | 3 | Real | System | | 9 rows |
| 8 | TIEMPO_R5I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 9 | TIEMPO_R6I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 10 | TIEMPO_R4I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 11 | TIEMPO_R4V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 12 | TIEMPO_R6V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 13 | TIEMPO_R5V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 14 | MINIMO | | | | Real | System | | 0 rows |

Figura 7.8. Variables utilizadas en la simulación sector 2

| | Name | Comment | Rows | Columns | Data Type | Clear Option | File Name | Initial Values |
|----|---------------|---------|------|---------|-----------|--------------|-----------|----------------|
| 1 | CAMIONES_R9I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 2 | TIEMPO_R9I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 3 | TIEMPOS_RUTAS | | 3 | 3 | Real | System | | 9 rows |
| 4 | CAMIONES_R9V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 5 | TIEMPO_R9V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 6 | CAMIONES_R7I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 7 | CAMIONES_R8I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 8 | TIEMPO_R7I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 9 | TIEMPO_R8I | | | | Real | System | | 0 rows |
| 10 | CAMIONES_R7V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 11 | CAMIONES_R8V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 12 | TIEMPO_R7V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 13 | TIEMPO_R8V | | | | Real | System | | 0 rows |
| 14 | MINIMO | | | | Real | System | | 0 rows |

Figura 7.9. Variables utilizadas en la simulación sector 3.

Recursos: los recursos son elementos que se utilizan en los procesos para la realización de ciertas actividades. En este trabajo se definieron dos tipos de recursos: los “caminos” y los “fill point”. Los caminos son los recursos asociados al proceso de regado que se realiza en las rutas, esto permite que no entren dos camiones al mismo tiempo en una misma ruta. Por otro lado, fill point

corresponde al recurso asociado al proceso de llenado y cumple la misma función que el recurso en las rutas. Cada uno tiene una capacidad fija de recibir una entidad por vez.

| | Name | Type | Capacity | Busy / Hour | Idle / Hour | Per Use | StateSet Name | Failures |
|---|------------|----------------|----------|-------------|-------------|---------|---------------|----------|
| 1 | CAMINO 1 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 2 | CAMINO 3 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 3 | CAMINO 2A | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 4 | CAMINO 2B | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 5 | FILL POINT | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |

Figura 7.10. Recursos asociados al sector 1.

| | Name | Type | Capacity | Busy / Hour | Idle / Hour | Per Use | StateSet Name | Failures |
|---|--------------|----------------|----------|-------------|-------------|---------|---------------|----------|
| 1 | CAMINO 5 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 2 | CAMINO 6 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 3 | CAMINO 4 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 4 | FILL POINT 1 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |

Figura 7.11. Recursos asociados al sector 2.

| | Name | Type | Capacity | Busy / Hour | Idle / Hour | Per Use | StateSet Name | Failures |
|---|--------------|----------------|----------|-------------|-------------|---------|---------------|----------|
| 1 | CAMINO 9 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 2 | CAMINO 7 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 3 | CAMINO 8 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |
| 4 | FILL POINT 1 | Fixed Capacity | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | 0 rows |

Figura 7.12. Recursos asociados al sector 3.

7.7 ANEXO G: Ingreso de datos del modelo de simulación

Toda ruta está acompañada de los assign con los cuales se definen las variables de camiones por la ruta y tiempo en la ruta.

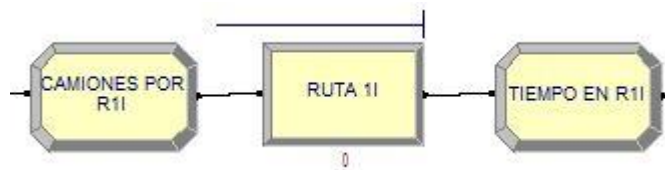


Figura 7.13. Cadena de módulos para el funcionamiento de la ruta.

Los camiones por rutas están definidos de la manera que se presenta en la figura 7.14. Se crea una variable llamada "CAMIONES_R11" y se le da un valor.

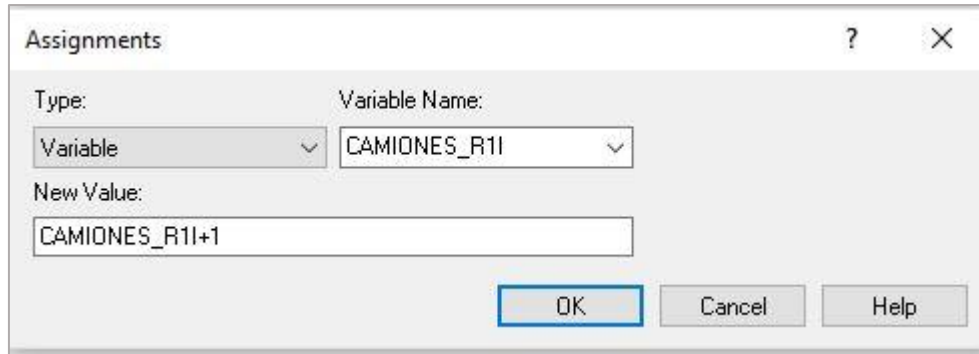


Figura 7.14. Definición de la variable para número de camiones.

La ventana de edición de las rutas contempla nombre, tipo de acción, la definición de un recurso y el tipo de demora. En este caso, la variable “TIEMPO_RUTA” es la que da los valores de demora.

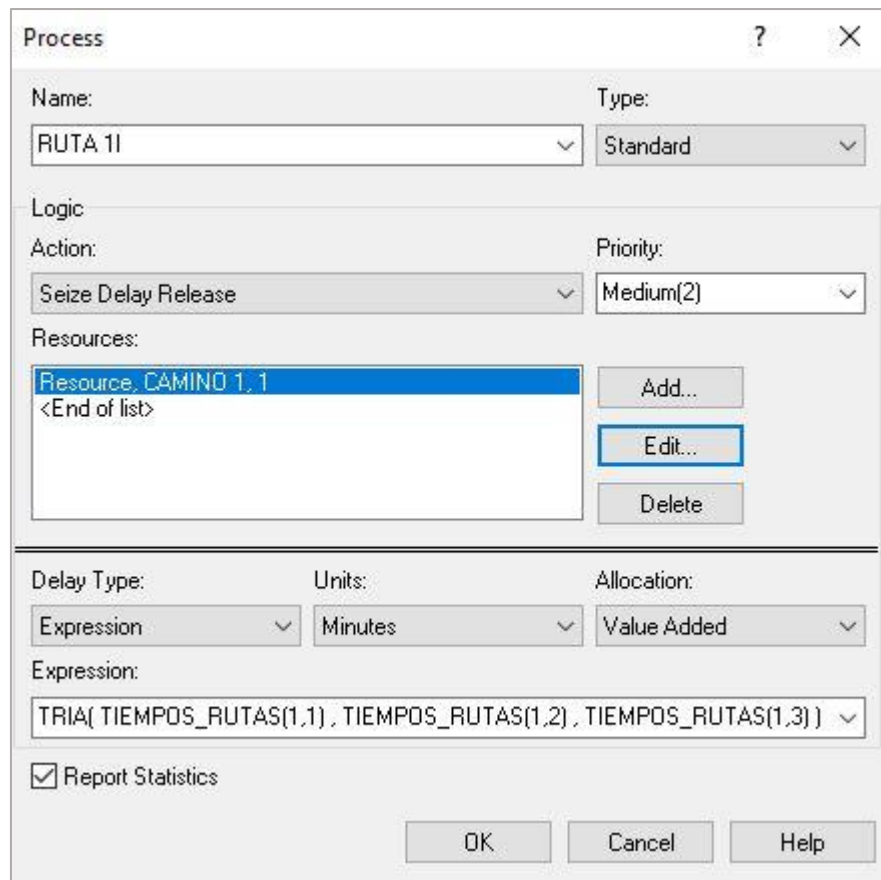


Figura 7.15. Ventana de edición proceso de rutas.

Los recursos se definen dentro de los procesos, sin embargo, también tiene una ventana de edición que permite nombrarlo y darle capacidad de recepción de entidades como se presenta en la figura 7.16.

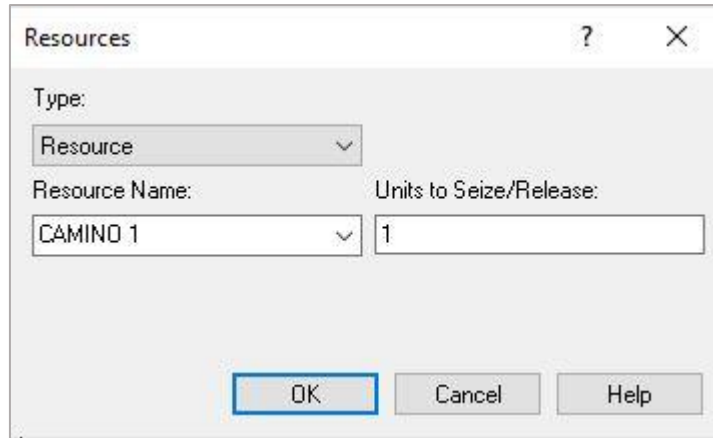


Figura 7.16. Ventana de edición recursos.

Posterior al recorrido del camión por la ruta, se registra el tiempo que este demoró en regarla. Esto se logra mediante el módulo assign y la definición de la variable TIEMPO_RUTA...” que se presenta en la figura 7.17.

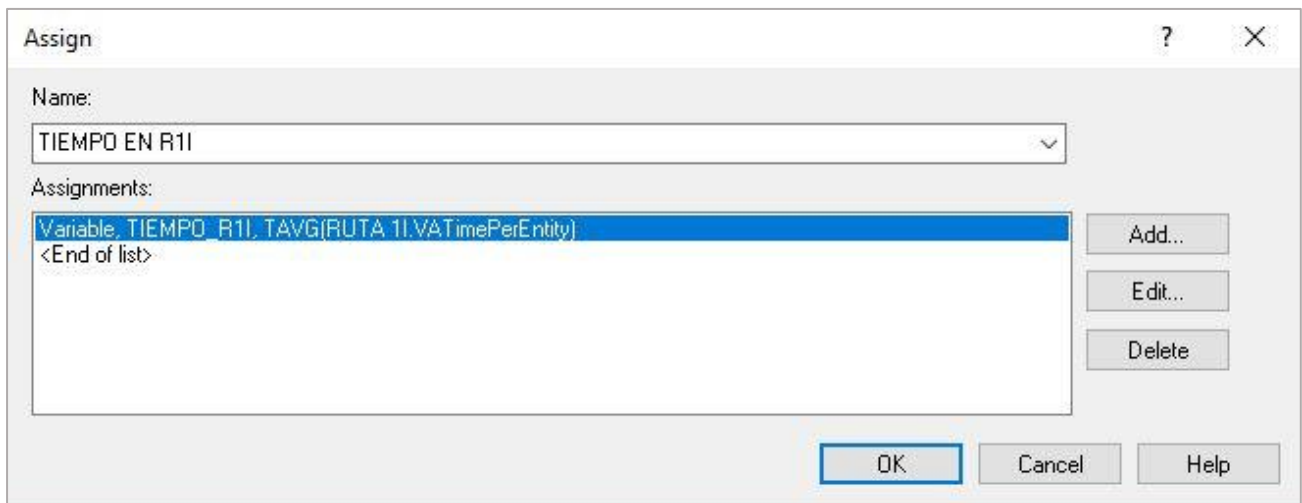


Figura 7.17. Ventana de edición tiempo en ruta.

Para las decisiones se presentan las figuras 7.18 y la figura 7.19 las cuales representan la forma en que se desarrollan todas las decisiones a lo largo de la simulación.

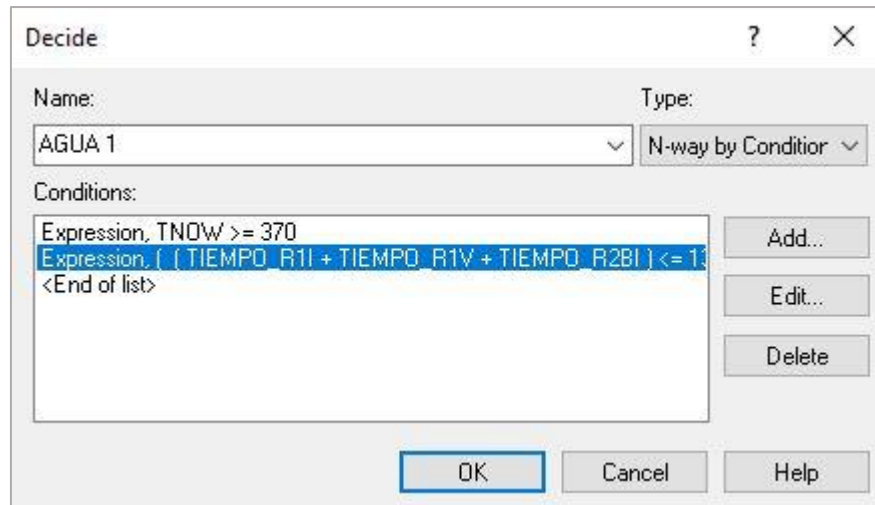


Figura 7.18. Ventana de edición para decisión en base a cantidad de agua.

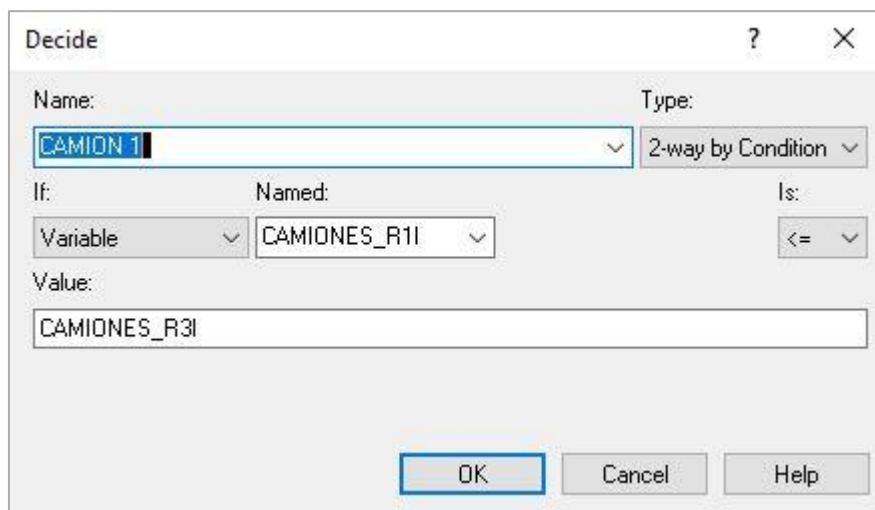


Figura 7.19. Ventana de edición para decisión en base a cantidad de camiones que han ingresado a ruta.

El módulo Route trasladar a la entidad a la zona de llenado cuando esta así lo decide, contemplando un tiempo de demora.

Route

Name:
DE R1

Route Time: TRIA(3.3 , 4.1 , 6.1)

Units: Minutes

Destination Type: Station

Station Name: Station 1

OK Cancel Help

Figura 7.20. Ventada de edición Route.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

| | | |
|---|---------------|--|
| Título: Evaluación de flota de camiones aljibes y puntos de llenado y sus alternativas en una mina a cielo abierto con software Arena. | | |
| Nombre Memorista: SUSANA MACARENA VALENZUELA MOLINA | | |
| Modalidad | Investigación |  Prof. Asieh Hekmat |
| Concepto | MUY BUENO | |
| Calificación | 6.6 | |
| Fecha | 29.08.2024 | |
|   Prof. Ramón Díaz N. | | Ingeniero Supervisor: |
| | | Institución: |
| Comisión (Nombre y Firma) | | |
|  Prof. René Gómez P. | |  Prof. Jorge Palma V. |
| Resumen | | |
| <p>El polvo o material particulado es considerado un gran problema en distintas industrias, siendo la minera una de ellas. La gran cantidad de material en suspensión que se genera debido a la actividad minera trae consigo consecuencias que afectan de diferentes maneras a operarios, equipos, comunidades cercanas y también al rendimiento y eficiencia de la operación.</p> <p>Para el control adecuado del polvo se suelen utilizar camiones aljibes, cuya flota se debe adecuar a las necesidades de la mina.</p> <p>En este trabajo se representa la situación actual de una mina a cielo abierto que contempla 4 camiones aljibes y tres puntos de llenado para el control del polvo, también se evalúan 5 posibles alternativas que contemplan el aumento a 5, 6 y 7 camiones aljibes y la ubicación de nuevos puntos de llenado en dos sectores de la mina. Todo esto mediante la utilización del software de simulación Arena.</p> <p>Los resultados de la simulación indican que la flota actual de la mina no da abasto y no logra la frecuencia de riego esperada. Sin embargo, dentro de los escenarios alternativos se puede concluir que una flota de 6 camiones con un punto de llenado extra se acerca a los estándares impuestos.</p> | | |