



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**“EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL CONTROL DE POLUCIÓN Y RECONSTRUCCIÓN
DE CARPETA DE RODADO EN CAMINO INDUSTRIAL LOS BRONCES CON
SUPRESOR DE POLVO”**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

DANIEL IGNACIO CAVADA VERA

**PROFESOR GUÍA
IVAN BRAGA CALDERÓN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN

El camino de acceso a Los Bronces tiene una extensión de 30 km entre el sector de Corral Quemado y la mina Los bronces, este camino presenta condiciones climáticas adversas y alto flujo vehicular, es por esto el control de polución y las mantenciones que se realizan actualmente al camino industrial, representan un gran desafío para la operación y pasan a ser un foco importante, debido al consumo de agua y gasto en mantención, asociado al método tradicional (humectación) para el control de la polución.

En base a lo anterior, Anglo American solicitó una evaluación económica del control de polución y reconstrucción de carpeta de rodado en camino industrial de Los Bronces, mediante el uso de la mejor alternativa de supresión de polvo, para este caso en particular. Esto con el fin de lograr una disminución de consumo de agua y reducción del gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado.

En base a análisis comparativo de supresores de polvo existentes en el mercado nacional y evaluando el nivel de eficiencia, impacto ambiental y efectos en la operación, se logró seleccionar e implementar la mejor solución de supresión de polvo para el caso de Los Bronces, que resultó ser el supresor de polvo de tipo bituminoso (emulsión asfáltica).

Durante el año 2015, se implementó el uso del supresor de polvo recomendado (emulsión bituminosa), y se fueron registrando los gastos y consumos asociados a la iniciativa. En base a los resultados obtenidos, se puede mencionar que se logró una disminución de consumo de agua en un 69%, y redujo el gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado en un 45%, respecto al caso base (año 2014).

Por otra parte, a través del uso del supresor tipo bituminoso, se logró disminuir en un 80.3% las emisiones MP2,5 promedio, mientras que para el MP10 se logró una reducción de 81,7%, respecto al caso base (2014). Esto representa los excelentes resultados que permite alcanzar el uso de este tipo de supresor de polvo, entregando caminos libres de polvo, logrando mejores condiciones laborales para los trabajadores de la faena y las comunidades aledañas, aumentando la seguridad e higiene en la operación y reduciendo además el impacto ambiental.

Por su parte, la evaluación del impacto económico que tuvo la implementación del supresor de polvo tipo bituminoso arrojó un beneficio neto de KUS\$ 429 al año, lo que representa una disminución del 17% del gasto en reconstrucción de la carpeta y control de la polución, respecto al caso base (año 2014).

El ahorro de cerca de un 70% del consumo de agua, genera un beneficio que está fuera del alcance de este trabajo, y que considera la utilización de 34.886 m³ para el procesamiento de minerales en la planta, un costo de oportunidad que fue aprovechado por esta iniciativa y que sin duda generó beneficio, considerando además la crítica situación de sequía que sufrió Los Bronces durante el 2015.

TABLA DE CONTENIDO.

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes Generales.....	2
1.1.1	Mina Los Bronces.....	2
1.1.2	Acceso a la mina.....	3
1.2	Objetivos.....	5
1.2.1	Objetivo General.....	5
1.2.2	Objetivos Específicos.....	5
1.3	Alcance.....	5
1.3.1	Restricciones.....	6
1.4	Metodología	7
2	MARCO CONCEPTUAL	9
2.1	Generalidades.....	10
2.1.1	¿Qué es el Polvo?.....	10
2.1.2	Polvo en Caminos.....	10
2.1.3	Tipos de Material Particulado (MP).....	11
2.1.4	Problemas Asociados al Polvo en Caminos.....	12
2.2	Marco Legal	13
2.2.1	Decreto Supremo N° 185/92.....	13
2.2.2	Decreto Supremo N° 45/01.....	14
2.3	Métodos de Medición de Material Particulado	15
2.3.1	Métodos Estáticos.....	15
2.3.2	Métodos Móviles.....	15
2.4	Supresores de Polvo.....	18
2.4.1	Agua.....	19
2.4.2	Sales y Cloruros.....	20
2.4.3	Polímeros Sintéticos.....	20
2.4.4	Productos Orgánicos No Bituminosos.....	21
2.4.5	Productos Bituminosos.....	21
2.4.6	Productos Electroquímicos.....	22
2.5	Reparación de Carpeta de Rodado.....	23
2.5.1	Escarificado.....	23
2.5.2	Recebado.....	24
2.5.3	Adición de Agua y Mezcla.....	24
2.5.4	Compactación.....	26
3	DESARROLLO	27
3.1	Línea Base.....	27
3.1.1	Consumo de Agua 2014.....	27
3.1.2	Gasto en Maquinaria de Mantenimiento 2014.....	29

3.1.3	Gasto en Agua y Control de Polución 2014.....	32
3.1.4	Gasto Total Camino 2014.....	34
3.1.5	Emisión de Material Particulado 2014.....	35
3.1.6	Identificación de Oportunidades.....	37
3.2	Revisión de Supresores en la Minería Nacional	38
3.3	Determinación del Supresor Óptimo para Los Bronces	39
3.4	Implementación del Supresor de Polvo	43
3.5	Resultados de la Iniciativa.....	47
3.5.1	Consumo de Agua 2015.....	47
3.5.2	Gasto en Maquinaria de Mantenición 2015.....	49
3.5.3	Gasto en Agua y Control de Polución 2015.....	52
3.5.4	Gasto Total Camino 2015.....	53
3.5.5	Emisión de Material Particulado 2015.....	55
3.6	Evaluación Económica.....	59
3.6.1	Impacto Económico del Uso del Supresor.....	59
3.6.2	Costos del Uso del Supresor.....	60
3.6.3	Análisis de Sensibilidad del Supresor.....	62
4	CONCLUSIONES	64
4.1	Recomendaciones	65
5	BIBLIOGRAFÍA.....	66
6	ANEXOS.....	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características, riesgos y controles del camino de acceso a Los Bronces	4
Tabla 2. Artículo 66 Decreto 594/99.....	13
Tabla 3. Granulometría del material necesario para reparar la carpeta.....	23
Tabla 4. Consumo anual de agua 2014, asociado al camino industrial	28
Tabla 5. Gastos de maquinaria 2014, asociados al camino	30
Tabla 6. Gastos de agua y control de polución 2014, asociados al camino industrial.....	32
Tabla 7. Gastos totales 2014, asociados al camino industrial	34
Tabla 8. Material particulado promedio en el camino industrial, 2014	36
Tabla 9. Supresores utilizados por minas chilenas, durante el 2013 y 2014	39
Tabla 10. Eficiencia, impacto ambiental y efecto en operación de los tipos de supresores	42
Tabla 11. Consumo de agua, consumo de emulsión y dosificación durante el 2015.....	43
Tabla 12. Consumo anual de agua 2015, asociado al camino	47
Tabla 13. Consumos anuales de agua, 2014 vs 2015.....	48
Tabla 14. Gastos de maquinaria 2015, asociados a la reparación y mantención del camino. ...	50
Tabla 15. Gastos de agua y control de polución 2015, asociados al camino industrial.....	52
Tabla 16. Gastos en control de polución 2015, asociados al camino industrial	52
Tabla 17. Gastos totales 2014, asociados al camino industrial	54
Tabla 18. Material particulado promedio en el camino, 2015	56
Tabla 19. Impacto económico del uso del supresor de polvo	59
Tabla 20. Tabla de sensibilización del precio de la emulsión	62
Tabla 21. Tabla de sensibilización del volumen de la emulsión	63

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Consumo de agua 2014, asociado al camino	28
Gráfico 2. Distribución de consumo de agua 2014, asociado al camino.....	29
Gráfico 3. Gastos en maquinaria 2014, asociados al camino.....	30
Gráfico 4. Distribución de gastos de maquinaria 2014, asociado al camino	32
Gráfico 5. Gasto por agua y control de polución 2014, asociado al camino	33
Gráfico 6. Distribución de gastos de agua y control de polución 2014	33
Gráfico 7. Gastos totales 2014, asociados al camino.....	34
Gráfico 8. Distribución de gastos totales 2014, asociados al camino	35
Gráfico 9. Comportamiento de la emisión de material particulado en 2014.....	36
Gráfico 10. Comportamiento de la dosificación de insumos para la mezcla supresora	44
Gráfico 11. Magnitud de evento climático agosto 2015.....	45
Gráfico 12. Consumo de agua 2015, asociado al camino	47
Gráfico 13. Distribución de consumo de agua 2015, asociado al camino.....	48
Gráfico 14. Consumo de agua asociado al camino, 2014 vs 2015.....	49
Gráfico 15. Gastos en maquinaria 2015, asociados al camino.....	50
Gráfico 16. Distribución de gastos de maquinaria 2014, asociado al camino	51
Gráfico 17. Gasto por agua y control de polución 2015, asociado al camino	53
Gráfico 18. Distribución de gastos de agua y control de polución 2015	53
Gráfico 19. Gastos totales 2015, asociados al camino.....	54
Gráfico 20. Distribución de gastos totales 2015, asociados al camino	55
Gráfico 21. Comportamiento de la emisión de MP en 2015	56
Gráfico 22. Comparación de la Emisión de MP2,5, 2014 vs 2015.....	57
Gráfico 23. Comparación de la Emisión de MP10, 2014 vs 2015.....	57
Gráfico 24. Evolución de la distribución del gasto 2014 vs 2015.....	60
Gráfico 25. Costo anual en control de polución, 2014 vs 2015.....	61
Gráfico 26. Costo anual en reconstrucción de carpeta, 2014 vs 2015.....	61

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema de la operación Los Bronces.....	2
Ilustración 2. Mapa del camino de acceso a Los Bronces.....	3
Ilustración 3. Esquema resumen de la metodología de trabajo.....	7
Ilustración 4. Polvo emitido en caminos no pavimentados.....	9
Ilustración 5. Dimensión del MP respecto a un pelo humano (U.S. EPA).....	11
Ilustración 6. Problemas de visibilidad por exceso de polvo en el camino.....	12
Ilustración 7. Equipo DustMate deTurnkey Instrument.....	17
Ilustración 8. Montaje del equipo DustMate en camioneta.....	17
Ilustración 9. Cambio de propiedades físicas asociadas al uso de supresor.....	18
Ilustración 10. Barra con boquillas de dosificación del supresor.....	18
Ilustración 11. Aplicación de agua como supresor de polvo.....	19
Ilustración 12. Aplicación de cloruro de magnesio.....	20
Ilustración 13. Aspecto del Lignosulfonato.....	21
Ilustración 14. Aplicación de emulsiones asfálticas.....	22
Ilustración 15. Aspecto del Cloruro de Amonio en Polvo.....	22
Ilustración 16. Motoniveladora procediendo a escarificar el camino.....	23
Ilustración 17. Retroexcavadora estandarizando camellón.....	24
Ilustración 18. Camión Aljibe agregando el agua necesaria.....	25
Ilustración 19. Rodillo realizando compactación del camino.....	26
Ilustración 20. Carpeta de rodado con supresor bituminoso, minera Los Pelambres.....	41
Ilustración 21. Camino industrial de Los Bronces con supresor de polvo bituminoso.....	44
Ilustración 22. Condición de caminos mina post temporal.....	45
Ilustración 23. Despeje de nieve en el camino industrial.....	46

1 INTRODUCCIÓN

El camino de acceso a Los Bronces, que está bajo la responsabilidad de la superintendencia de Operación Invierno y Caminos, tiene una extensión de 30 km entre el sector de Corral Quemado y la mina Los bronces, con un ancho promedio de 10 m. Este camino tiene 4500 flujos vehiculares mensuales en promedio, tomando en cuenta todo tipo de vehículos: camionetas, buses y camiones de variados tonelajes y dimensiones. Por otra parte, este camino se encuentra en alta montaña, por ende, está expuesto a condiciones climáticas extremas, y fuera de lo común a la mayoría de los caminos públicos y privados que hay en Chile. En particular esta ruta se ve expuesta a más de 7 m de nieve promedio anualmente, y a temperaturas que llegan a los -21°C . Produciendo una erosión y desgaste mayor, al que sufren los caminos no pavimentados en el resto del país.

Las condiciones climáticas adversas, el alto flujo vehicular y la criticidad de contar con un solo acceso principal a la faena, representan un gran desafío para la operación Los Bronces, la cual tiene un programa de control de polución realizado a través de métodos tradicionales (regadío con agua), como además un programa de mantención de carpeta de rodado semanal, mensual y anual.

Por otra parte, para el control de la polución y reconstrucción del camino industrial, se consume un volumen importante de agua, lo cual representa un alto costo de oportunidad para Los Bronces, considerando que para el año 2015 se proyecta una gran sequía y escases del vital elemento.

Considerando todo lo mencionado anteriormente, se ha encargado como trabajo de tesis realizar una evaluación económica del control de polución y reconstrucción de carpeta de rodado en camino industrial de Los Bronces, mediante el uso de la mejor alternativa de supresión de polvo, para este caso en particular. Esto con el fin de lograr una disminución de consumo de agua para la humectación del camino de acceso a Los Bronces, y disminución del gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado.

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

1.1.1 Mina Los Bronces

Los Bronces es una mina de cobre y molibdeno que se explota a rajo abierto. Se encuentra ubicada en la Región Metropolitana, comuna de Lo Barnechea, a 65 kilómetros de Santiago y a 3.500 metros sobre el nivel del mar.

El mineral que se extrae es chancado y derivado a las plantas de molienda Los Bronces (61 ktpd) y Confluencia (87 ktpd), para luego ser transportado como pulpa por un mineroducto de 56 kilómetros a la planta de flotación Las Tórtolas (40 km al norte de Santiago y 750 msnm), en la que se produce cobre y molibdeno contenido en concentrado. La mina también produce un volumen menor de cobre en cátodos en la planta San Francisco, a partir de la lixiviación de sulfuros de baja ley.

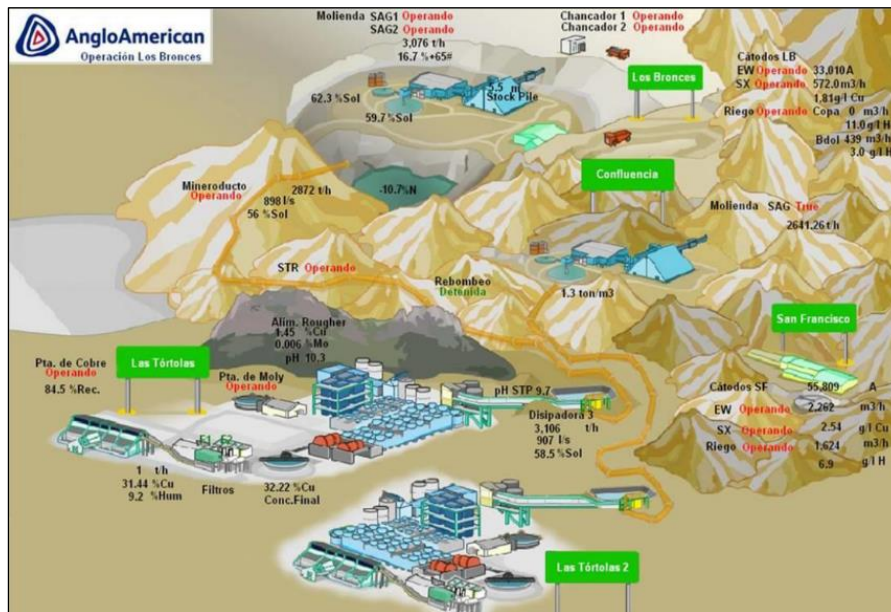


Ilustración 1: Esquema de la operación Los Bronces.

La producción durante el año 2015 fue de 401.715 toneladas de cobre fino, además de 2.430 toneladas de molibdeno contenido en concentrado. La producción de cobre fino se distribuye en un 9% de cátodos de alta pureza y 91% de concentrado de cobre.

El movimiento mina es generado principalmente por 7 palas eléctricas, 3 palas diésel, 2 cargadores frontales y 72 camiones de alto tonelaje, además de 10 perforadoras y 44 equipos de apoyo a la operación. Los Bronces cuenta con una dotación aproximada de 5.800 trabajadores, entre personal propio y contratistas de operación y proyectos.

El clima en la mina se caracteriza por tener un fuerte invierno desde junio a septiembre, en el cual precipitan entre 3 y 7 metros de nieve, por ende la planificación minera considera 28 días con clima adverso, impactando fuertemente su producción.

En cuanto a recursos y reservas, Los Bronces contiene 1509 Mt @ 0.61% CuT de reservas, 4505 Mt@ 0.38% CuT de recursos y 607 @ 0.31% CuT de reservas lixiviables, las que sustentan una vida de la mina mayor a los 30 años.

1.1.2 Acceso a la mina

El acceso a la mina Los Bronces se realiza a través de la Ruta G-21 (Santiago-Farellones), recorriendo 16 km aproximadamente, hasta llegar al sector de Corral Quemado, donde se continúa por la ruta G-245 que conecta con el camino industrial a Los Bronces en el sector de Paso Marchant, donde se encuentra el control de acceso a la faena.

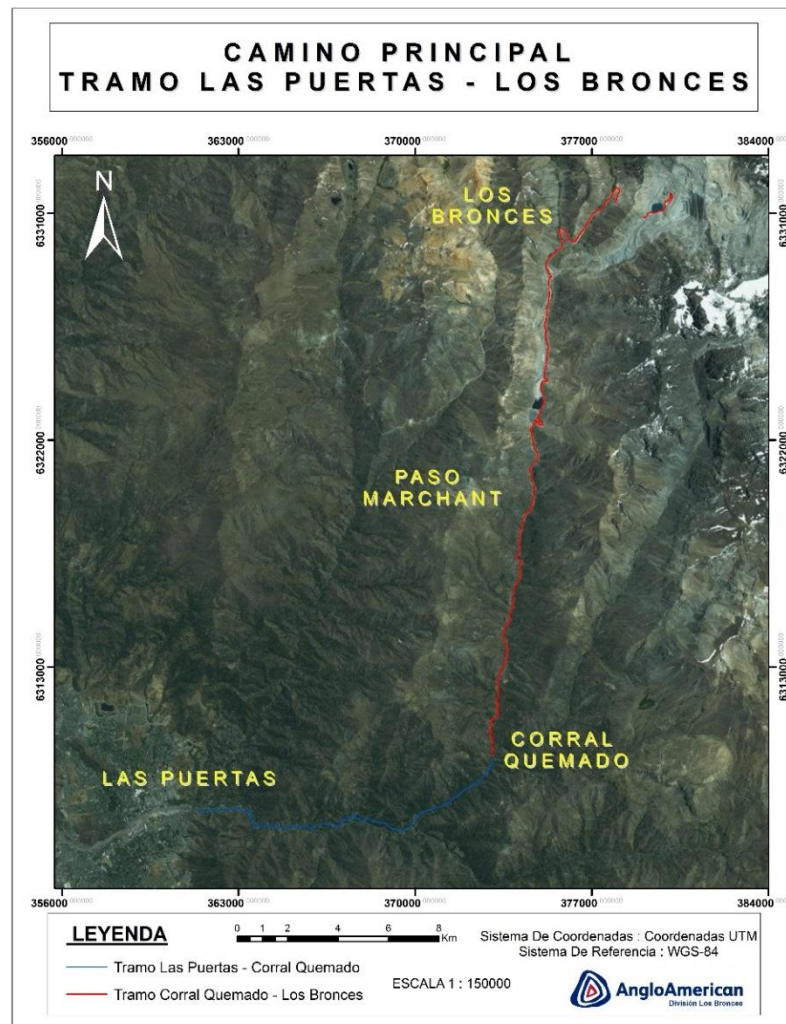


Ilustración 2. Mapa del camino de acceso a Los Bronces

El camino desde Santiago hasta el sector de Corral Quemado está pavimentado con carpeta asfáltica, a partir de ahí y hasta Los Bronces, se tiene un camino de tierra debidamente construido y estabilizado, con material seleccionado y cloruro de sodio, para disminuir la emisión de polvo.

Cabe destacar que el camino industrial presenta características de montaña y condiciones climatológicas adversas, es por esto que es relevante exponer la identificación de riesgos, para cada tramo o sector, incluyendo el control realizado actualmente como plan de mitigación, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Características, riesgos y controles del camino de acceso a Los Bronces

TRAMO	km/Pend. Max.	RIESGO	CONTROL
Las puertas - Corral Quemado	16/8%	Caida de Piedas Aluvión Resbalamiento hielo Accidente Vehicular	Uso de cadenas, control de hielo Manejo en cordillera Muros de contención
Corral Quemado - Paso Marchant	11/12%	Caida de Piedas Aluvión Resbalamiento hielo/nieve Accidente Vehicular	Acuñamientos Reglamento Op. Invierno Inspección de quebradas
Paso Marchant - San Francisco	12/13%	Avalanchas Caida de Piedas Aluvión Resbalamiento hielo/nieve Accidente Vehicular	Cañones 106 mm, Gazex, Muros Reglamento Op. Invierno Camellones internos Sostenimiento de piedas Uso de cadenas, control de hielo Manejo en cordillera
San Francisco - Confluencia	7/8%		
San Francisco - Los Bronces	7/8%		

Tal como se muestra en la tabla 1, el camino está compuesto por varios tramos que conectan las principales zonas de trabajo en Los Bronces, donde destacan:

- Paso Marchant: es el acceso controlado a la mina. Solo pueden ingresar personas y vehículos autorizados.
- Perez Caldera: es el principal campamento de la mina, está ubicado entre paso Marchant y San Francisco.
- San Francisco: es el sector donde se encuentra la planta de cátodos, la cual queda justo debajo del botadero de material lixiviado.
- Confluencia: es el sector donde se encuentra la planta de molienda Confluencia.
- Los Bronces: es el sector donde se ubican el taller Titán (taller de mantención y oficinas de la mina), edificio Placa (oficinas gerencia y pequeño hotel), la Planta de molienda Los Bronces y el rajo mismo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Lograr una disminución de consumo de agua para control de polución del camino de acceso a Los Bronces, y disminución del gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado, a través de la incorporación de nuevas tecnologías de supresión de polvo y estabilización de caminos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar tecnologías alternativas para la supresión de polvo, existentes en el mercado nacional.
- Seleccionar la mejor solución de supresión de polvo y mantención de caminos para el caso de Los Bronces, a través benchmark, nivel de eficiencia, impacto ambiental y efectos en la operación.
- Evaluar el impacto económico de la implementación del nuevo sistema de supresión de polvo en Los Bronces, respecto al caso base (año 2014, sin uso de supresor).

1.3 ALCANCE

Exponer información relevante del año 2014, analizando en detalle los resultados en gastos asociados al método tradicional de control de polución y mantención de caminos, con el fin de realizar el levantamiento del caso base e identificar los potenciales de mejora u oportunidades.

Revisar las soluciones que están utilizando en otras faenas mineras a nivel nacional para controlar la polución en los caminos, como también recomendar la alternativa de supresor óptimo, o aquella que tenga altas probabilidades de tener buenos resultados económicos y ambientales, bajo las condiciones climáticas a las que está expuesto el camino industrial de Los Bronces.

Realizar una prueba operativa del uso de supresor de polvo recomendado durante el año 2015, considerando su programa de dosificación y las condiciones externas presentes en el período de aplicación, registrando y analizando los resultados obtenidos durante la implementación de la iniciativa.

Evaluar económicamente el uso del supresor, poniendo foco en los objetivos de este trabajo: generar ahorros en control de polución y reconstrucción de carpeta de rodado.

Finalmente, y en base al trabajo realizado, se formularán conclusiones y recomendaciones asociadas a este caso de estudio.

1.3.1 Restricciones

- La evaluación se limita al tramo del camino industrial de 30 km comprendido entre el sector de Corral Quemado y la mina Los Bronces, considerando datos anuales del período entre febrero de 2014 y enero del 2016.
- La información técnica y procedimiento asociado a la reconstrucción de carpeta de rodado, que será expuesto en este trabajo, solo es aplicable a las condiciones del camino industrial de Los Bronces. No se incluyen métodos alternativos de reparación de carpeta, debido a que escapa al alcance de este trabajo.
- Para efectos de este estudio se considerará el año 2014, como los 12 meses entre febrero del 2014 y enero del 2015. Por su parte, el año 2015 estará compuesto desde febrero de 2015 hasta enero del 2016.
- Los resultados y conclusiones de este trabajo solo son válidas para el caso específico de Los Bronces, y por ende, no son extrapolables a otras faenas mineras que puedan presentar condiciones ambientales similares.
- La información comercial del proveedor del servicio de supresión de polvo que sea seleccionado e implementado, no será revelado por políticas de privacidad, tanto de la empresa contratista como de Anglo American.
- La información que este trabajo recoge y contiene respecto de las operaciones y actividades de Anglo American Chile Ltda. y/o de cualquiera de las divisiones mineras e industriales operativas, así como la integridad e interpretación de la información, los análisis y conclusiones derivadas de ella, sólo corresponden a su autor y, en consecuencia son de exclusiva responsabilidad, por lo que no comprometen en forma alguna a Anglo American Chile Limitada, sus divisiones operativas o empresas propietarias, como tampoco a sus ejecutivos, profesionales o técnicos. Anglo American Chile Ltda. Únicamente ha colaborado con el autor en facilitarle acceso a sus instalaciones e información para la realización de esta tesis y no tiene opinión ni participación alguna en su contenido.

1.4 METODOLOGÍA

Este trabajo considera 4 etapas principales, con actividades definidas y estructuradas en cada una de ellas, según el diagrama de flujo o esquema resumen representado en la ilustración 3.

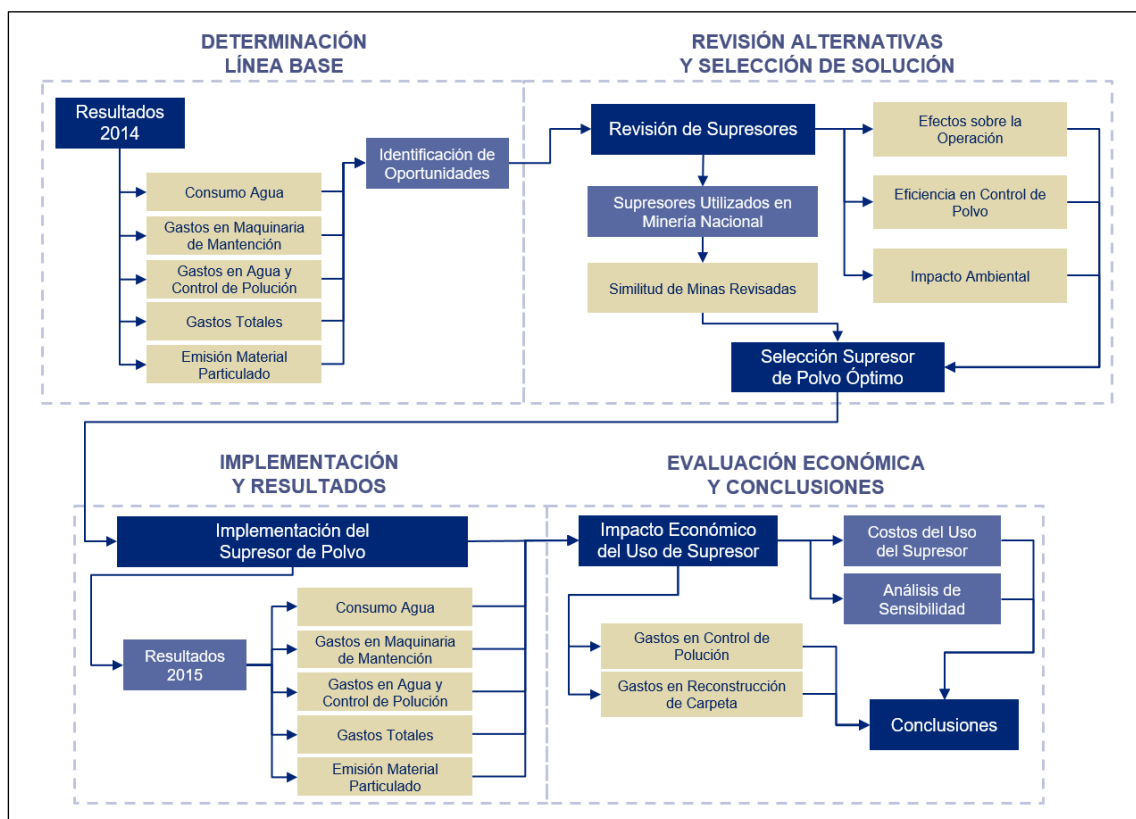


Ilustración 3. Esquema resumen de la metodología de trabajo

A continuación el detalle de cómo se llevará a cabo el trabajo, en cada una de las etapas:

a. Determinación Línea Base

En esta etapa se pretende mostrar información relevante del año 2014 o caso base, analizando en detalle los resultados en gastos asociados al método tradicional de control de polución y mantenimiento de caminos, proporcionados como antecedentes por Anglo American y emisiones de material particulado medidas por Los Bronces. Esto con el fin de identificar potenciales de mejora y las oportunidades que presenta el caso base.

b. Revisión de Alternativas y Selección de Solución

En base al potencial de mejora que presenta el caso base, se realiza una revisión de alternativas de supresión de polvo, a través de un estudio de benchmark en minería nacional y el análisis de los efectos sobre la operación, eficiencia en control de polvo e impacto ambiental de las alternativas disponibles en el mercado. Esto con el propósito de seleccionar la mejor alternativa de supresión de polvo para este caso de estudio, en base a las directrices que entrega el estudio comparativo previo.

c. Implementación y Resultados

Consiste en la prueba operativa del uso de supresor durante el año 2015, revisando su programa de dosificación, y las condiciones o variables externas que se presentan durante el período de implementación (12 meses). Esta etapa pretende entregar resultados concretos del año 2015, en base a información de los gastos asociados al camino industrial, proporcionados por Anglo American y emisiones de material particulado medidas por Los Bronces. La categorización de la información mantendrá el mismo esquema de la línea base, para poder realizar una discusión y análisis comparativo de los resultados.

d. Evaluación Económica y Conclusiones

En esta etapa se pretende evaluar el impacto económico del uso del supresor, poniendo foco en los objetivos de este trabajo, esto es: generar ahorros en control de polución y reconstrucción de carpeta de rodado. Para esto se realizará una evaluación económica comparando la línea base con los resultados obtenidos durante la prueba operativa durante el 2015. Además incluye la obtención del costo anual asociado a la implementación del supresor de polvo y un análisis de sensibilidad, respecto al precio y al volumen contratado.

Finalmente, y en base a todo el trabajo realizado, se formularán las conclusiones y recomendaciones asociadas a este caso de estudio.

2 MARCO CONCEPTUAL

En Chile, existen aproximadamente 77.700 Km. de rutas públicas, ya sean locales, regionales e internacionales, de las cuales solo un 25% aproximadamente están pavimentadas. Todo el resto de caminos de la red vial chilena, están constituidos por caminos de ripio y tierra.

El tráfico por rutas no pavimentadas, son unas de las principales fuentes de material particulado, tal como se muestra en la Ilustración 4. Las emisiones de polvo, en muchos casos pueden provocar daños a la salud de las personas, debido a que estas partículas pueden viajar varios cientos de metros, penetrando en las casas cercanas y afectando cultivos.



Ilustración 4. Polvo emitido en caminos no pavimentados

Los caminos industriales mineros, no son ajenos a esta situación, y es por este motivo que se hace muy importante desarrollar un estudio sobre el control de la emisión de polvo, principalmente determinar qué elementos técnicos se deben considerar para desarrollar tratamientos de supresión de polvo, y cuantificar de manera real el gasto asociado al aplicar distintas alternativas para la supresión de polvo.

Algunas de las opciones para realizar el tratamiento a los caminos no pavimentados son las siguientes:

- Pavimentar los caminos, lo cual involucra una alta inversión de recursos económicos que puede no justificarse para caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito.
- Aplicar tratamientos superficiales asfálticos, los cuales se pueden considerar un pavimento más económico, pero también requiere una alta inversión de recursos.
- Implementar un adecuado programa de gestión y conservación de los caminos no pavimentados para restablecer periódicamente su estándar.
- Mejorar las propiedades físicas y/o mecánicas del suelo que conforma la carpeta de rodado, mediante la utilización de la técnica de estabilización química del suelo y/o la aplicación de Supresores de Polvo.

Algunas de estas alternativas pueden ser mucho más costosas que otras, pero deben ser aplicadas según las condiciones y requisitos de cada camino.

2.1 GENERALIDADES

2.1.1 ¿Qué es el Polvo?

La Real Academia de la lengua española señala que el polvo es un residuo que queda de otras cosas sólidas, moliéndolas hasta reducirlas a partes muy menudas.

El polvo se compone de partículas sólidas, cuya granulometría varía entre 1 a 1000 micrones, presentes en la atmósfera que se derivan de varias fuentes, tales como: el polvo del suelo levantado por el viento, erupciones volcánicas y la contaminación.

El polvo en los hogares, oficinas y otros ambientes humanos contiene pequeñas cantidades de polen de las plantas, pelos humanos y animales, fibras textiles, fibras de papel, los minerales del suelo al aire libre, las células de piel humana, y muchos otros materiales que se pueden encontrar en el entorno local.

2.1.2 Polvo en Caminos

El tránsito en caminos no pavimentados representa una fuente lineal importante de emisión de material particulado a la atmósfera, pudiendo llegar a componer hasta el 40% del aire cercano a una ruta no pavimentada.

El control de polvo es un reto importante en caminos no sellados con altos niveles de tráfico vehicular, tales como minas y vertederos de basura. El polvo del camino puede ser suprimido por métodos mecánicos, como los vehículos de barrido, con los aceites vegetales, o con pulverizadores de agua.

Los factores o variables que condicionan la emisión de polvo en los caminos no pavimentados son:

- Contenido de limo o material particulado fino en la pista.
- Velocidad a la que circulan los vehículos por el camino.
- Peso de los vehículos que utilizan la ruta.
- Número de vehículos o flujo presente en el camino.

2.1.3 Tipos de Material Particulado (MP)

- a. Polvo inhalable (MP10): Es aquella fracción de polvo que entra en el cuerpo, pero es atrapado en la nariz, la garganta, y vías respiratorias superiores. La medida del diámetro de este polvo es mayor o igual a $10\ \mu\text{m}$.
- b. Polvo respirable (MP2,5): Son aquellas partículas bastante pequeñas para penetrar la nariz y el sistema superior respiratorio y profundamente en los pulmones. Las partículas que penetran superan los mecanismos de despacho naturales del cuerpo y tienen mayor probabilidad de ser conservadas en el organismo.

En la ilustración 5 se puede apreciar la dimensión de dichas partículas:

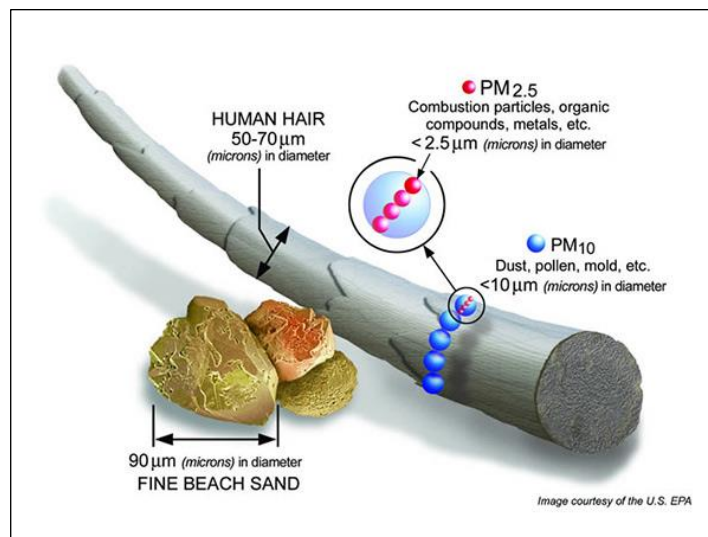


Ilustración 5. Dimensión del MP respecto a un pelo humano (U.S. EPA)

Las partículas MP10 y MP2,5 pueden causar problemas a la salud. Por viajar más profundamente en los pulmones y por estar compuesta por algunos elementos tóxicos (como metales pesados y compuestos orgánicos).

Las partículas MP2,5 pueden producir tos y dificultad para respirar, agravar el asma, provocar daño a los pulmones (incluyendo la disminución de su función y enfermedades respiratorias de por vida), y en casos extremos muerte en individuos con enfermedades de corazón y pulmón.

2.1.4 Problemas Asociados al Polvo en Caminos

Un camino industrial no pavimentado debe mantenerse en óptimas condiciones, a través de la mantención y estabilización o supresión del polvo, debido principalmente a los siguientes problemas asociados a los caminos en mal estado y que producen exceso de material particulado.

- a. Al oscurecer la visión de los conductores empeora, debido a las nubes de polvo en suspensión, aumentando el riesgo de accidentes de tránsito.



Ilustración 6. Problemas de visibilidad por exceso de polvo en el camino

- b. El material fino en los caminos, producto de la acción de las ruedas de los vehículos en movimiento, es convertido en partículas de polvo, siendo liberado al ambiente, traduciéndose en pérdidas económicas para la administración de los caminos.
- c. El material particulado fino puede resultar abrasivo, por lo que aumenta considerablemente el desgaste de las piezas móviles de los vehículos.
- d. Las partículas de polvo, producto de las precipitaciones, se “lavan”, siendo depositadas muchas veces en ríos, arroyos y lagos, aumentando su turbidez.
- e. El material particulado puede viajar varios cientos de metros, penetrando en las casas y cubriendo los cultivos.
- f. El polvo afecta la salud de las personas, provocando enfermedades respiratorias y alergias, siendo también un transportador de otras enfermedades.

2.2 MARCO LEGAL

Así como la Actividad Minera se encuentra regulada en su proceso extractivo, esto también ha ido acompañado de un marco legal que permite tanto la regulación de actividades, de la seguridad e impacto ambiental.

Los valores límites de exposición a material particulado en los lugares de trabajo están regidos a través de un marco regulatorio, con la finalidad de minimizar o reducir el riesgo sobre la salud de los trabajadores.

La legislación nacional establece los límites máximos permisibles para los contaminantes sílice de cuarzo cristalizada, arsénico y material particulado, además de regular las emisiones a la atmósfera de los equipos de control y captación de material particulado. Si existiesen estos contaminantes que perjudiquen la salud de los trabajadores, se deben captar en su origen e impedir su dispersión por el lugar de trabajo además de impedir que sobrepasen el Limite Permissible Ponderado (LPP).

Por otra parte, la legislación establece los límites permisibles ponderados a los que se pueden someter los trabajadores durante una jornada de trabajo. Estos límites no podrán exceder la presencia de los químicos contaminantes durante la jornada de trabajo de 8 horas o durante la semana laboral de 45 horas.

El promedio ponderado de las concentraciones ambientales de contaminantes químicos no podrán superar los LPP (Límites Permisibles Ponderados), estos límites se pueden exceder momentáneamente pero no deben superar en cinco veces el valor de LPP, y tales excesos no podrán repetirse más de cuatro veces dentro de la jornada diaria ni más de una vez en una hora. A continuación se expone en la Tabla N° 1 Art. 66: Límites Permisibles Ponderados para las concentraciones ambientales.

Tabla 2. Artículo 66 Decreto 594/99.

SUSTANCIA	LIMITE PERMISIBLE PONDERADO		OBSERVACIONES
	ppm	mg/m ³	
Sílice Cristalizada Cuarzo	N/A	0,08	4
Polvos no clasificados (fracción respirable)	N/A	2,4	4
Polvos no clasificados (Total)	N/A	8	3
3: Polvo exento de Asbesto y con menos de 1% de Sílice Cristalizada Libre			
4: Fracción Respirable			

2.2.1 Decreto Supremo N° 185/92.

Ministerio de Minería. Reglamenta el funcionamiento de los establecimientos emisores de Anhídrido Sulfuroso, material particulado y Arsénico en todo el territorio de la República y establece normas primarias y secundarias de calidad del aire para material particulado respirable y Anhídrido Sulfuroso.

Norma Primaria de Calidad del aire para: Material Particulado respirable: ciento cincuenta microgramos por metro cúbico normal (150 mg/Nm^3), como concentración media aritmética diaria 24 horas.

2.2.2 Decreto Supremo N° 45/01

Establece la norma anual para MP10. Se considerará sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un periodo anual en cualquier estación monitorea clasificada como EMPR, sea mayor o igual a $150 \text{ ug/m}^3\text{N}$.

Asimismo, se considerara superada la norma, si antes que concluyese el primer periodo anual de mediciones certificadas por el Servicio de Salud competente se registrase en algunas de las estaciones de monitores de material particulado respirable MP10 clasificada como EMPR, un número de días con mediciones sobre el valor de $150\text{ug/m}^3 \text{ N}$ mayor que siete.

A contar del día primero de enero del año 2012, la norma primaria de calidad del aire para el contaminante Material Particulado Respirable MP10, será de ciento veinte microgramos por metro cúbico nominal ($120 \text{ ug/m}^3 \text{ N}$) como concentración de 24 horas, salvo que a dicha fecha haya entrado en vigencia una norma de calidad ambiental para Material Particulado Fino MP 2.5 en cuyo caso se mantendrá el valor de la norma establecido en el inciso primero.

La norma primaria de calidad del aire para el contaminante Material Particulado Respirable MP10, es cincuenta microgramos por metro cúbico normal ($50 \text{ ug/m}^3\text{N}$) como concentración anual.

Se considerará sobrepasada la norma primaria anual de calidad del aire para material particulado respirable MP10, cuando la concentración anual calculada como promedio aritmético de 3 años calendarios consecutivos, en cualquier estación monitorea clasificada como EMRP, sea igual o mayor que $50 \text{ ug/m}^3\text{N}$.

2.3 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Los sistemas de medición de material particulado, son todos aquellos en los cuales existe una metodología que busca contar las partículas de polvo presentes en el entorno, ya sean en el aire o al costado del camino. Estos métodos a su vez, pueden ser clasificados en dos sub-categorías, Móviles y Estáticos. Los primeros, corresponden a los sistemas que van acoplados a un vehículo, el cual transita por el camino de estudio y los Estáticos, son dispuestos en el camino de tal manera que captan las partículas de polvo depositadas en recipientes ubicados estratégicamente al costado de estos.

2.3.1 Métodos Estáticos

Corresponde a aquellos métodos de medición de polvo, en que los captadores de partículas se encuentran en puntos fijos del camino de pruebas. A continuación se señalan breves descripciones de estos métodos:

a. Sedimentación

Es una técnica simple de muestreo usado para determinar la cantidad de partículas o polvo precipitado desde la atmósfera. El método requiere del uso de colectores abiertos, usualmente de vidrio o plástico. Luego de un tiempo de exposición (alrededor de 1 mes), el material acumulado es expresado en términos de peso por área por 30 días. Esta técnica presenta muchas desventajas, dentro de las cuales se puede mencionar el período de tiempo para una medición y el efecto del viento en las mediciones

b. Fotométrico

Un equipo fotoeléctrico estacionario es utilizado para medir la densidad del polvo generado por el tráfico, mientras que el polvo decanta en un colector (método sedimentación). Luego se hace el cruce de información entre el colector y la fotometría. Una de las ventajas de este método es que entrega resultados inmediatos en terreno, pero su gran desventaja es que la medición sólo refleja que ocurre en un único punto del camino.

2.3.2 Métodos Móviles

El control de emisiones de polvo en estos casos, se realiza con equipamientos móviles especiales, los cuales buscan cuantificar objetivamente la cantidad de partículas de polvo MP10 y MP2,5 presentes en el camino. A continuación se señalan breves descripciones de estos métodos:

a. Polvometro

Es un dispositivo que va conectado detrás de una de las ruedas traseras del vehículo de investigación. Su forma de trabajo consiste, en tomar muestras continuas de polvo, a medida que avanza por el camino de prueba. El Aparato consta de:

- Un contenedor de metal conteniendo un papel filtro de fibra de vidrio montado sobre el parachoques trasero de una camioneta.
- Un generador eléctrico.
- Una bomba succionadora de gran caudal. La caja del filtro posee una abertura que está cubierta por una malla coladora de 450 micrones que da la cara a la rueda. Esta malla previene la introducción de partículas distintas de polvo en el filtro durante las mediciones.
- Software de monitoreo, el cual está configurado para analizar las muestras y el escurrimiento del agua en la superficie de prueba, en el caso que existiera escurrimiento producto de las lluvias.

Para realizar la prueba, el vehículo se desplaza a una velocidad de 70 km/h, produciendo polvo en suspensión por la acción del neumático sobre la superficie de contacto, este material particulado es captado por el papel filtro, en la bomba succionadora, siendo retirado una vez acabada la experiencia, analizado y pesado en el laboratorio, obteniéndose así la cantidad total de polvo del camino.

b. Scamper

El método de medición está compuesto por:

- Tres entradas de tubo metálico, por los cuales entran partículas de polvo. Dos entradas son montadas detrás de las ruedas delanteras, y otra se sitúa debajo del vehículo, en el parachoques delantero.
- Un instrumento para medir la distribución de partículas de tamaño entre 0,25 y hasta 30 μm , denominado sistema GRIMM, el cual es un precipitador electroestático. Este dispositivo se utiliza para atrapar partículas mediante su ionización, atrayéndolas por una carga electroestática inducida.
- Un sistema GPS, el cual proporciona la posición y la velocidad del vehículo en un intervalo de 1 s.

Los datos son recopilados y mostrados por un ordenador que viaja a bordo del vehículo.

c. Dustmate

El método utiliza un aparato portátil llamado “DustMate” (deTurnkey Instrument, ilustración 7), el cual contiene una bomba en su interior que permite obtener una muestra del aire circundante. El equipo cuenta además con un fotómetro láser que permite cuantificar el número y tamaño de las partículas en suspensión, que posee el flujo de aire del volumen conocido entregado por la bomba, la cual aspira a 600 cc/min.



Ilustración 7. Equipo DustMate deTurnkey Instrument

Para realizar las mediciones se instala el aspirador en el parachoques trasero del vehículo, justo detrás de la rueda trasera (ilustración 8), de manera de obtener directamente la cantidad de polvo generada por la tracción del neumático con la carpeta. El vehículo a medida que recorre el camino permite al equipo ir almacenando datos segundo a segundo del nivel de polvo en cada punto.



Ilustración 8. Montaje del equipo DustMate en camioneta

Una vez realizada la medición, el equipo se conecta al computador para poder transferir los datos obtenidos.

Este método es el más utilizado actualmente, dado que presenta ventajas considerables, dentro de las que destaca la medición de la concentración de polvo en cada punto del tramo evaluado, identificando diferencias dentro de los tramos y emisiones de cada punto por separado.

2.4 SUPRESORES DE POLVO

Los supresores de polvo, cualquiera sea el tipo, reducen la emisión de partículas a través de la modificación de las propiedades físicas de la superficie. Una vez aplicado un supresor de polvo, las partículas y material del suelo son agrupadas y capturadas, haciéndolas más pesadas, lo que permite evitar la polución por esta vía, mejorando la calidad del aire y la visibilidad del camino.



Ilustración 9. Cambio de propiedades físicas asociadas al uso de supresor

Algunos supresores forman una película superficial por aglomeración de partículas, lo que requiere de una gran cantidad de producto para no romperse. Otros, como las emulsiones bituminosas, logran una carpeta de rodado de propiedades asfálticas, seguras y resistentes.

Muchos de los productos orgánicos bituminosos y no bituminosos son combinados con aglomerantes y emulsificantes, que aportan propiedades de adhesividad para que las partículas de polvo se agrupen y peguen, evitando su elevación.

La sal y derivados de cloruros no obstante logran un efecto visual favorable, con una superficie de base higroscópica que absorbe la humedad, generan una condición jabonosa e insegura ante presencia de humedad.



Ilustración 10. Barra con boquillas de dosificación del supresor

La forma tradicional y más eficiente de aplicar los supresores es con una barra aspersora, dosificando con inyectores o boquillas especialmente diseñadas para una cobertura eficiente del camino. La formación superficial puede requerir movimiento de tierra y compactación, dependiendo del tránsito que soportará y el material de la superficie.

2.4.1 Agua

La aplicación de agua como supresor de polvo es una solución de corto plazo y opera a partir de la aglomeración de partículas en la superficie. Dependiendo de la temperatura y humedad tiene una eficiencia relativa de rango acotado entre 30 minutos y 12 horas.

El porcentaje de control de polvo del agua en caminos ha sido estimado en un 40%. Su capacidad de controlar polvo decrece desde 100% a 0% en muy corto tiempo, especialmente si el clima es caluroso y seco.



Ilustración 11. Aplicación de agua como supresor de polvo

El agua es más eficiente donde el tránsito vehicular es limitado. Además, es un bien muy escaso en la industria minera. Por otra parte, no evita la elevación de partículas más finas que se generan, ya que el agua no encapsula el camino.

A su vez, el sobrerriego facilita la formación de barro, lo que dificulta la limpieza y mantenciones de equipos, genera erosión acelerada y determina mayores cortes en neumáticos OTR, ya que afila cantos de roca.

2.4.2 Sales y Cloruros

Las sales más ampliamente usadas son el cloruro de magnesio ($MgCl_2$) y el cloruro de calcio ($CaCl_2$). Éstas suprimen polvo a partir de la atracción de la humedad del ambiente. El cloruro de sodio no es muy usado en regiones áridas, porque solo absorbe agua cuando la humedad excede el 75%.

El cloruro de calcio, en tanto, absorbe la humedad del ambiente en función de la humedad relativa y la temperatura del entorno. Es más efectivo en lugares que tienen alta humedad y bajas temperaturas; a $25^{\circ}C$ comienza a absorber agua al 29% de humedad relativa y a $38^{\circ}C$ al 20%.



Ilustración 12. Aplicación de cloruro de magnesio

El cloruro de magnesio, por su parte, incrementa la tensión superficial y genera una superficie más dura que el cloruro de sodio cuando se seca. Sin embargo, requiere un mínimo de 32% de humedad para absorber el agua ambiental, independiente de la temperatura, con lo que genera una superficie inestable ante la presencia de agua.

Comparadas con el agua, las sales son más eficientes en el control de polvo, si se logra controlar la humedad requerida; sin embargo, no forman una capa impermeable, con lo que su composición migra fácilmente del camino al ambiente, modificando la salinidad del suelo y pH del agua.

2.4.3 Polímeros Sintéticos

Las propiedades adhesivas de los polímeros sintéticos promueven la ligazón de las partículas del suelo. Estos polímeros pueden fortalecer la superficie del camino, aumentando la tensión de rotura en 10 veces, lo que en clima seco permite mantener su densidad compactada. Sin embargo, tienden a fallar en presencia de agua, neblina o temperaturas bajo cero, ya que se congelan o resquebrajan al no tener la flexibilidad suficiente.

En general, los polímeros compactan eficientemente, pero no impiden la generación de polvo, al saturarse la superficie donde han sido aplicados.

2.4.4 Productos Orgánicos No Bituminosos

- a. Los lignosulfonatos actúan como cementante, ligando las partículas del suelo entre sí. Tienden a mantener la plasticidad, permitiendo la compactación del suelo cuando son aplicados en caminos con alto contenido de arcilla. La eficiencia y superficie de los lignosulfonatos puede ser reducida o completamente destruida en presencia de lluvia. Estos productos escurren por la solubilidad que poseen en agua. No logran formar una superficie hidrorrepelente.



Ilustración 13. Aspecto del Lignosulfonato

- b. Los aceites vegetales son generalmente una mezcla de glicéridos y provienen de semillas y/o frutos. Algunos ejemplos de aceites vegetales son: canola, soya, semilla de algodón. Actúan originando la aglomeración de las partículas de suelo, creando una suave costra sobre la superficie, pero su eficiencia es de corto plazo.
- c. Las melazas o productos derivados de la caña de azúcar ligan temporalmente las partículas de suelo. Para su permanencia es necesario realizar aplicaciones constantes, principalmente porque son hidrosolubles. El producto se ve afectado por la humedad ambiental y la presencia de lluvias.

2.4.5 Productos Bituminosos

En este grupo se incluyen los asfaltos cortados y emulsiones asfálticas, entre otros. Actúan aglomerando partículas finas, generalmente formando una superficie que mantiene las partículas de suelo en su lugar.

Encapsulan y estabilizan la superficie de rodado, obteniendo una eficiente respuesta, similar al pavimento, con propiedades de visibilidad y seguridad como las de caminos asfaltados. Bajo condiciones adecuadas de suelo y material de relleno, esta solución puede mantener un camino de vehículos livianos estabilizado y encapsulado por más de un año.



Ilustración 14. Aplicación de emulsiones asfálticas

Son productos muy resistentes, insolubles en agua, sin presentar evaporación. Generalmente resisten el rodado y poseen un alto punto de tensión de rotura, traspasando la fortaleza de la base a su superficie.

Existen emulsiones asfálticas que se complementan con aglomerantes y emulsificantes, los cuales son pieza clave en su eficacia, ya que impiden –en casos particulares– la lixiviación del agente bituminoso, pues no todos los tipos de suelo compactan de la misma manera.

Las emulsiones de alto contenido bituminoso (sobre 50%) forman una carpeta altamente resistente a la carga y rodado, de gran adherencia e hidrorrepelente, no siendo resbaladiza ante la presencia de agua o humedad.

2.4.6 Productos Electroquímicos

Estos supresores son usualmente derivados de petróleo sulfonatado y productos altamente iónicos. Se incluyen en este grupo los aceites sulfonatados, enzimas y cloruro de amonio. Los estabilizadores electroquímicos trabajan expulsando el agua adsorbida por el suelo, disminuyendo las burbujas de aire, incrementando la compactación del suelo. Dependen fuertemente de la composición mineral del suelo y arcilla, por lo que son efectivos ante la presencia de ciertos minerales específicos.



Ilustración 15. Aspecto del Cloruro de Amonio en Polvo

2.5 REPARACIÓN DE CARPETA DE RODADO

La reparación de una carpeta de rodado en un camino no pavimentado es una actividad fundamental, dado que mantiene la ruta en buenas condiciones. Cabe destacar que esta metodología de reconstrucción de carpetas de rodado no es la única que existe, pero es aquella que cumple con las principales reglas del manual de carreteras del MOP y la ocupada en el caso a estudiar. La reconstrucción de la carpeta de rodado está compuesta por actividades que serán definidas a continuación.

2.5.1 Escarificado

Para la mezcla a depositar en la carpeta se requiere material seleccionado que cumpla con la siguiente granulometría:

Tabla 3. Granulometría del material necesario para reparar la carpeta

Tamiz	% Pasante
2"	100
1 1/2"	100
1"	80 - 100
Nº 4	35 - 65
Nº 200	1 a 4
Límite Líquido	35 máximo
Índice Plasticidad	7 a 11
CBR	> 60

Antes de proceder al escarificado se deberá humedecer la carpeta con una dosis de entre 10 y 14% en peso, debido a que el suelo contiene un contenido de sal adicionada en procesos anteriores, lo que mantiene la superficie dura.

Se deberán lavar y retirar todos los áridos de tamaño mayor a 3". Finalmente, el espesor a escarificar es en promedio de 10 cm.



Ilustración 16. Motoniveladora procediendo a escarificar el camino

2.5.2 Recebado

Se extiende el material seleccionado al que se le agregará sal seleccionada en una razón de entre 8 y 12 kg/m², lo que corresponde aproximadamente de 4 a 5 pasadas.

El cordón deberá revolverse a razón de 3 a 4 pasadas de lado a lado hasta obtener una mezcla totalmente homogénea de material escarificado, finos y sal. El excedente del material obtenido se debe depositar siempre hacia el camellón.



Ilustración 17. Retroexcavadora estandarizando camellón

El camellón se mantiene de una altura no menor a 80 cm, correspondiente a la mitad del alto de la rueda más grande que utiliza el camino.

2.5.3 Adición de Agua y Mezcla

La humedad óptima de la mezcla nueva es de un 6%. La mezcla se deberá revolver hasta disolver totalmente la sal agregada, con lo que se debe obtener un aspecto semi-plástico, con posibilidad de amoldar el material con la mano y detectar humedad superficial. Si aún faltase humedad para llegar a ese aspecto se deberá agregar cantidades controladas de agua hasta obtenerlo.



Ilustración 18. Camión Aljibe agregando el agua necesaria

2.5.4 Compactación

La mezcla anteriormente lograda se expande logrando un espesor aproximado de 25 cm, el que será reducido por compactación a unos 20 cm. La expansión debe considerar un bombeo mínimo de 2%.

Se humedecerá la superficie levemente y se procederá al rodillado, preferentemente con un rodillo compactador de tambor.

El proceso de rodillado se realizará en 3 a 4 pasadas por punto, comenzando siempre desde la cuneta al centro (desde la caja y desde el camellón), esto para mantener el bombeo. En el caso de las curvas se deberá efectuar desde la pendiente menor a mayor respetando el peralte, y siempre en forma recta, no siguiendo el radio de giro.

La primera pasada de rodillo se hará en “Alta” y las posteriores en “Baja”, dado que las pasadas fuertes posteriores generan el efecto contrario, soltando el material que se encuentra en el fondo.



Ilustración 19. Rodillo realizando compactación del camino

La compactación óptima requerida es de 100%, con un mínimo de 95%, la que es controlada por un personal calificado.

Si en algún sector la humedad se satura, se deberá volver a efectuar el cordón, dejando evaporar el agua en exceso.

3 DESARROLLO

3.1 LÍNEA BASE

El camino de acceso a Los Bronces, que está bajo la responsabilidad de la superintendencia de Operación Invierno y Caminos, tiene una extensión de 30 km entre el sector de Corral Quemado y la mina Los bronces, con un ancho promedio de 10 m. El camino industrial de Los Bronces al ser un camino de alta montaña, está expuesto a condiciones climáticas extremas, como bajas temperaturas, nevazones, deshielo y uso de cadenas, lo cual favorece el desgaste de los caminos.

En general, debido a las climáticas adversas, los primeros 15 km del camino industrial sufran un menor desgaste que los siguientes 15 km, se puede explicar debido a la altitud en que se encuentran esos sectores. El primer tramo del camino (primeros 15 km) va entre la cota 1500 y 2600 msnm aproximadamente, mientras que el segundo tramo va entre los 2600 y 3600 msnm. Es por esto que la cantidad de precipitaciones en forma de nieve que afectan al sector más alto del camino, implicando un mayor desgaste de la carpeta, producido por la limpieza de nieve que realiza la maquinaria durante el invierno.

Las condiciones climáticas adversas, como el alto flujo vehicular, hacen necesario un programa de regadío con agua para el control de polución, como además un programa de mantención de carpeta de rodado.

Cada año se realiza un programa de mantención anual, donde se reconstruye la carpeta de rodado de toda la extensión del camino, debido al deterioro del mismo por efecto de las condiciones climáticas adversas durante el invierno. Esta campaña se lleva a cabo entre los meses de Noviembre y Enero, utilizando equipos de empresas contratistas. El costo de esta reconstrucción de la carpeta de rodado es de aproximadamente US\$ 2 Millones al año, demandado gran cantidad de recursos (mano de obra y horas de trabajo), implicando además cortes de camino, que afectan el óptimo funcionamiento del tránsito dentro del camino industrial de mina Los Bronces.

A continuación se detallarán los consumos de agua y los costos asociados a la mantención y reparación de caminos durante el año 2014 (Línea Base), considerando todas las variables asociadas.

3.1.1 Consumo de Agua 2014

Para el proceso de mantención y control de polución del camino industrial de Los Bronces, durante el año 2014, se mantuvo un consumo anual de agua según lo indicado en la tabla 4.

Tabla 4. Consumo anual de agua 2014, asociado al camino industrial

Consumo Agua (m ³)	2014												2015	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan		
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	1800	3600	3600	3600	12600	
Control de Polución	5400	5400	2700	1800	1800	1800	1800	2700	3600	3600	3600	3600	37800	
Total	5400	5400	2700	1800	1800	1800	1800	2700	5400	7200	7200	7200	50400	

Tal como se muestra en la tabla 4, durante el año 2014 se tuvo un consumo de agua para control de polución de 37.800 m³ de agua, mientras que para la construcción y reparación de carpeta se tuvo un consumo de 12.600 m³ de agua. Llegando a un total anual de 50.400 m³ de agua consumidos y dedicados exclusivamente al camino industrial.

En base a la tabla 4 se puede graficar el perfil de consumo anual de agua para el año 2014, tal como se muestra en el gráfico 1.

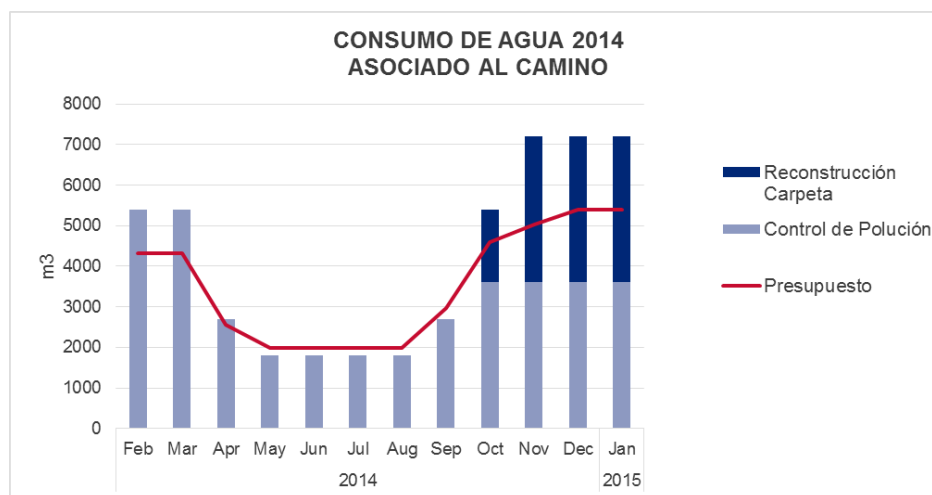


Gráfico 1. Consumo de agua 2014, asociado al camino

Tal como se muestra en el gráfico 1, se tiene un alto consumo de agua dedicada al control de polución en los períodos con menos precipitaciones, considerando los meses de febrero, marzo, noviembre, diciembre y enero. Esto debido principalmente a la mayor generación de polvo por el tránsito de vehículos. Cabe destacar que el consumo de agua para la construcción de carpeta se dispara a partir de octubre, cuando comienza la campaña de mantenimiento y reconstrucción de la carpeta, una vez que se acaba la operación de invierno.

Es relevante señalar que si bien el presupuesto de consumo de agua se mantiene estable y se cumple en el periodo invernal, sucede todo lo contrario en los demás meses, no logrando cumplir con el presupuesto de consumo de agua asociado al camino industrial. Esto debido principalmente, al alto consumo de agua en la reconstrucción de la carpeta de rodado.

Al terminar el año, no se da cumplimiento al presupuesto anual de consumo de agua establecido para el 2014 (42.525 m³), logrando un consumo real de 50.400 m³ de agua, lo que representa un consumo extra de 16%, respecto a lo presupuestado. Esto tiene directa relación e impacto en el aumento de uso de los camiones aljibes externos, que se utilizan para estas labores en el camino industrial.

Finalmente, se tiene que los 50.400 m³ de agua dedicados exclusivamente al camino industrial de acceso a Los Bronces, se distribuye porcentualmente como se muestra en el gráfico 2.

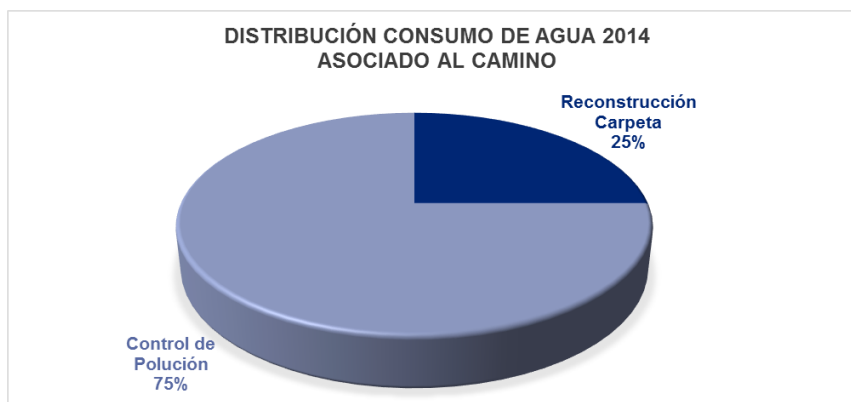


Gráfico 2. Distribución de consumo de agua 2014, asociado al camino

La mayor parte del agua dedicada y consumida en el camino industrial es para controlar la polución (75%), mientras que el resto es destinada a la reparación de la carpeta de rodado.

3.1.2 Gasto en Maquinaria de Mantenimiento 2014

Como antecedente general, es importante considerar que para la reparación de la capeta de rodado, se toma como criterio que se debe tener por lo menos 18 cm de material competente in situ, en cada uno de los tramos, para no tener que realizar aporte de material en la base de camino. La revisión de este criterio operativo se realiza a través de pruebas de laboratorio, a lo largo de todo el camino industrial de Los Bronces. Para el año 2014, se debió realizar la reconstrucción de la carpeta de rodado de los 30 km de camino debido, al desgaste y los resultados que arrojaron los resultados de las pruebas de laboratorio.

La reconstrucción de la carpeta va asociada a un mayor costo, ya que se hace necesario la compra de material de base del camino, y su transporte dentro de los 30 km del camino, para así construir una nueva carpeta de rodado de al menos 25 cm de espesor. Sin embargo, cabe destacar que esta es la situación que se repite año a año, después de afrontar el periodo invernal en la operación Los Bronces.

Contextualizado lo anterior, se tienen los costos asociados a maquinarias de reparación y mantenimiento de caminos durante el año 2014, presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Gastos de maquinaria 2014, asociados al camino

Costos Maquinaria (kUS\$)	2014											2015	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	302	704	704	302	2012
Mantenimiento Menor Camino	105	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210
Mantenimiento y Limpieza Invierno	0	0	159	159	159	159	159	159	159	0	0	0	954
Total	105	105	159	159	159	159	159	159	302	704	704	302	3176

Tal como se muestra en la tabla 5, el costo asociado a la reconstrucción de carpeta fue de kUS\$ 2.012, para la campaña de los 30 km del camino industrial Los Bronces. El costo total de maquinaria, incluyendo las tres principales labores asciende a kUS\$ 3.176.

En base a la tabla 5 se puede graficar el perfil de gasto anual en maquinaria para el año 2014, tal como se muestra en el gráfico 3.

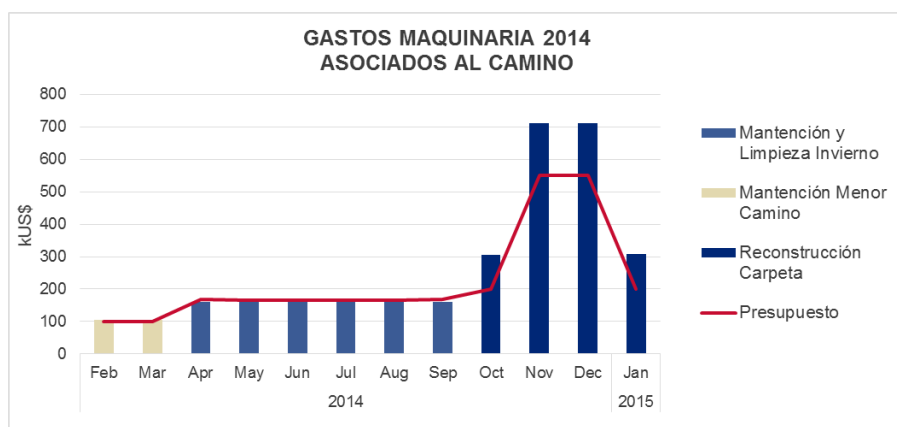


Gráfico 3. Gastos en maquinaria 2014, asociados al camino

Tal como se muestra en el gráfico 3, durante los meses de febrero a septiembre, la intensidad de gasto es menor y estable, dado que solo se realizan mantenimientos menores y aquellas limpiezas que son necesarias a causa de las condiciones climáticas adversas.

Es relevante señalar que si bien el presupuesto de gasto asociado a maquinaria se mantiene estable y se cumple entre febrero y septiembre, existe un importante incumplimiento del presupuesto desde octubre hasta enero. El cual está asociado principalmente a los excesivos costos de la reconstrucción de la carpeta de rodado. Esto debido principalmente, al deterioro provocado por el paso del período invernal.

Al terminar el año, no se da cumplimiento al presupuesto anual de gastos para maquinaria asociada al camino industrial establecido para el 2014 (kUS\$ 2.532), logrando un gasto real de kUS\$ 3.176, lo que representa un gasto extra de 15%,

respecto a lo presupuestado. Esto tiene directa relación e impacto en el aumento de uso del conjunto de maquinaria externa, que se utiliza para estas labores.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 3.176 gastados en maquinaria dedicada exclusivamente al mantenimiento y reparación del camino industrial de Los Bronces, se distribuyen porcentualmente como se muestra en el gráfico 4.

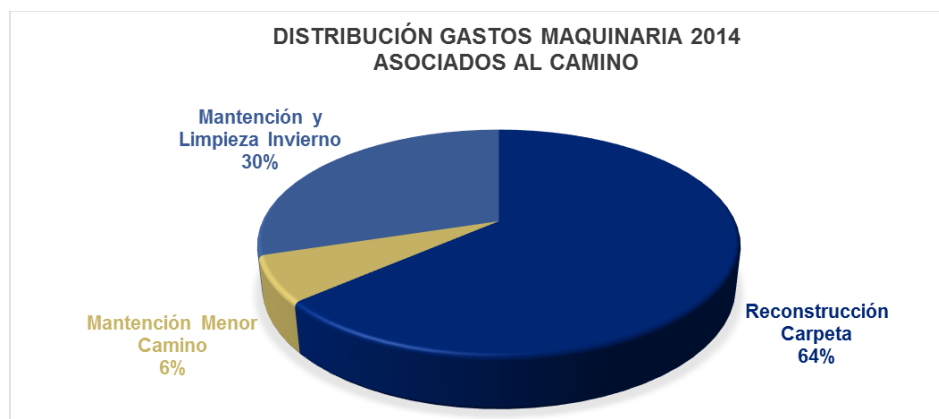


Gráfico 4. Distribución de gastos de maquinaria 2014, asociado al camino

En línea con lo mencionado durante esta sección, la mayor proporción de gasto por maquinaria está asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado (64%), seguido por la mantenimiento y limpieza en período invernal (30%), mientras que el resto está destinado a mantenimientos menores del camino.

3.1.3 Gasto en Agua y Control de Polución 2014

El consumo de agua anual detallado en la sección 3.1.1, tiene asociado una tarifa de US\$ 2 por el metro cúbico de agua industrial. Aplicando la tarifa al consumo del año 2014, y considerando el uso de 2 camiones aljibes de 30 m³ arrendados para humectación del camino, cuyo costo anual asciende a US\$400.000, se obtiene el perfil de gasto del año 2014 contenido en la tabla 6.

Tabla 6. Gastos de agua y control de polución 2014, asociados al camino industrial.

Costo Agua y Control de Polución (kUS\$)	2014												2015	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan		
Reconstrucción Carpeta (Agua)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	7	7	7	7	25
Control de Polución (Agua)	11	11	5	4	4	4	4	5	7	7	7	7	7	76
Arriendo de Aljibes (Regadío)	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	400
Total	44	44	39	37	37	37	37	39	44	48	48	48	48	501

Tal como se muestra en la tabla 6, el costo asociado al consumo de agua y control de la polución en el camino fue de kUS\$ 501, considerando el consumo para la reconstrucción de la carpeta, desde octubre a enero, y regadío constante durante todo el año de los 30 km del camino industrial Los Bronces.

En base a la tabla 6 se puede graficar el perfil de gasto anual en agua y control de la polución para el año 2014, tal como se muestra en el gráfico 5.

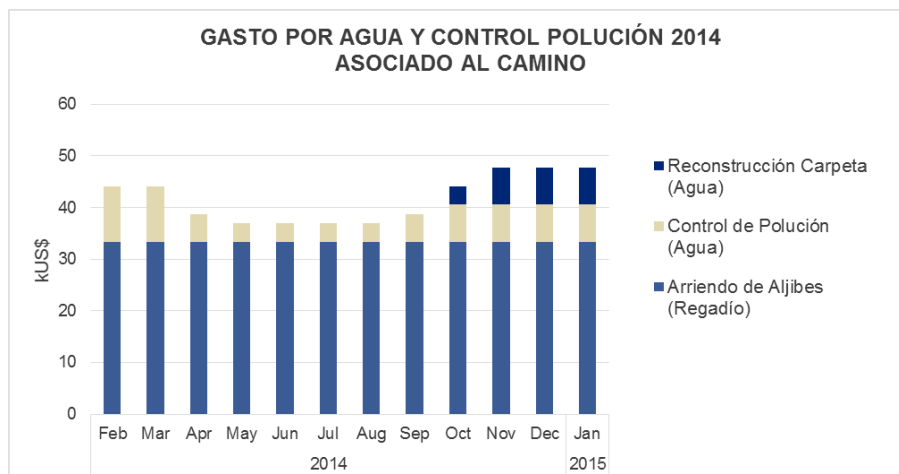


Gráfico 5. Gasto por agua y control de polución 2014, asociado al camino

El costo de mantener el regadío con agua durante los meses de Febrero a Septiembre, va a depender de la condición climática, durante el año 2014, el costo en regadío durante Febrero y Septiembre fue de KUS\$ 313 aproximadamente, esto considera el arriendo de los equipos de regadío y el agua consumida en esta labor.

Tal como se muestra en el gráfico 5, una vez más el gasto se dispara entre los meses de octubre y noviembre, debido al consumo extra de agua para la reconstrucción de la carpeta de rodado.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 501 gastados en agua y control de polución, asociados al camino industrial de Los Bronces, se distribuyen porcentualmente como se muestra en el gráfico 6.

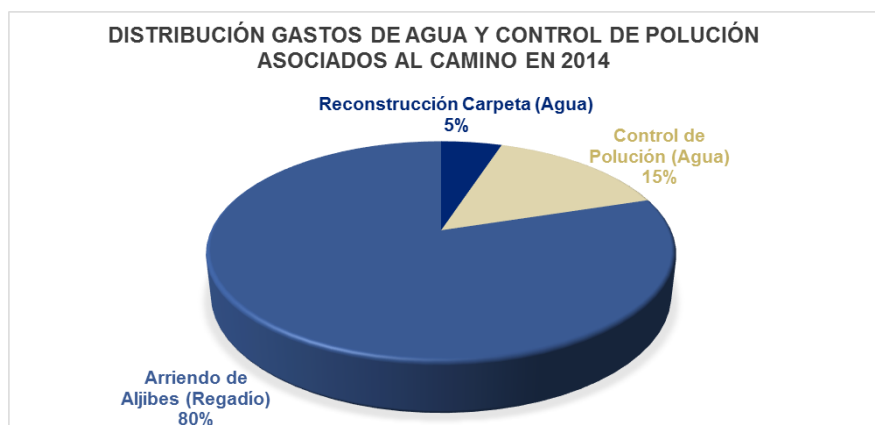


Gráfico 6. Distribución de gastos de agua y control de polución 2014

Cabe destacar que uno de los principales gastos asociados al control de polución es el arriendo de camiones aljibes, encargados del constante regadío del camino.

3.1.4 Gasto Total Camino 2014

En base a los antecedentes presentados en las secciones 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3, se puede generar un resumen de los gastos totales asociados a la mantención, reparación y control de polución en el camino industrial de Los Bronces. En la tabla 7, se presentan los gastos totales por ítem durante el año 2014.

Tabla 7. Gastos totales 2014, asociados al camino industrial

Costos Totales (kUS\$)	2014												2015	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan		
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	306	711	711	309	2037	
Mantención Menor Camino	105	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	210	
Mantención y Limpieza Invierno	0	0	159	159	159	159	159	159	0	0	0	0	954	
Control de Polución (Regadío)	44	44	39	37	37	37	37	39	41	41	41	41	476	
Total	149	149	198	196	196	196	196	198	346	752	752	350	3677	

Tal como se muestra, el costo anual total del camino industrial de Los Bronces fue de kUS\$ 3.677, considerando las labores de reconstrucción de la carpeta de rodado, mantenciones menores, mantención y limpieza en invierno y control de polución durante todo el año a través de regadío.

En base a la tabla 7 se puede graficar el perfil de gasto anual en agua y control de la polución para el año 2014.

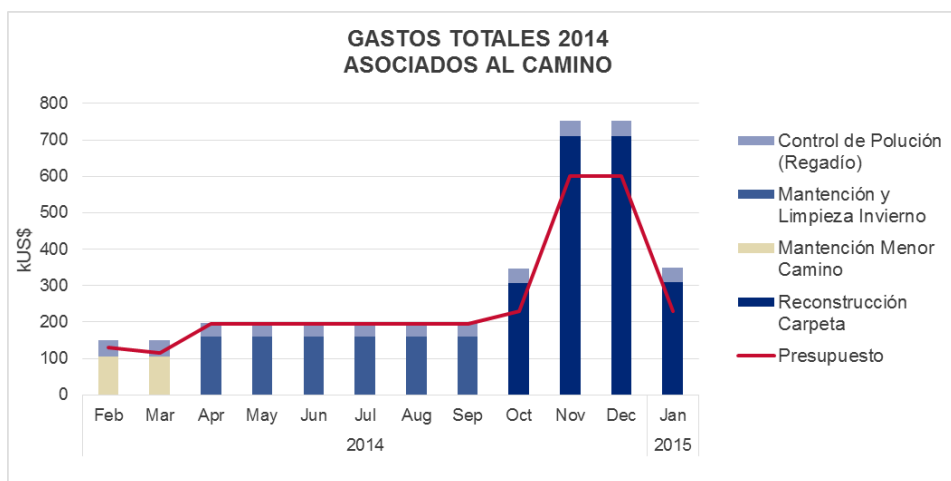


Gráfico 7. Gastos totales 2014, asociados al camino

Tal como se muestra en el gráfico 7, entre los meses de febrero a septiembre, la intensidad de gasto es menor y estable, dado que solo se realizan mantenciones menores y aquellas limpiezas que son necesarias a causa de las condiciones climáticas adversas normales durante el periodo invernal.

Cabe destacar que existe un importante incumplimiento del presupuesto desde octubre hasta enero. El cual está asociado principalmente a los excesivos costos de la reconstrucción de la carpeta de rodado. Esto debido principalmente, al deterioro provocado por el paso del período invernal.

Al terminar el año, no se da cumplimiento al presupuesto 2014 establecido para gastos asociados al camino industrial (kUS\$ 3.070), logrando un gasto real de kUS\$ 3.677, lo que representa un gasto extra de 16%, respecto a lo presupuestado. Esto tiene un fuerte impacto en el aumento de uso de recursos, tanto propios como externos, que se utilizan para estas labores.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 3.677 gastados en el mantenimiento, reparación, limpieza y control de polución del camino industrial de Los Bronces, se distribuyen porcentualmente como se muestra en el gráfico 8.

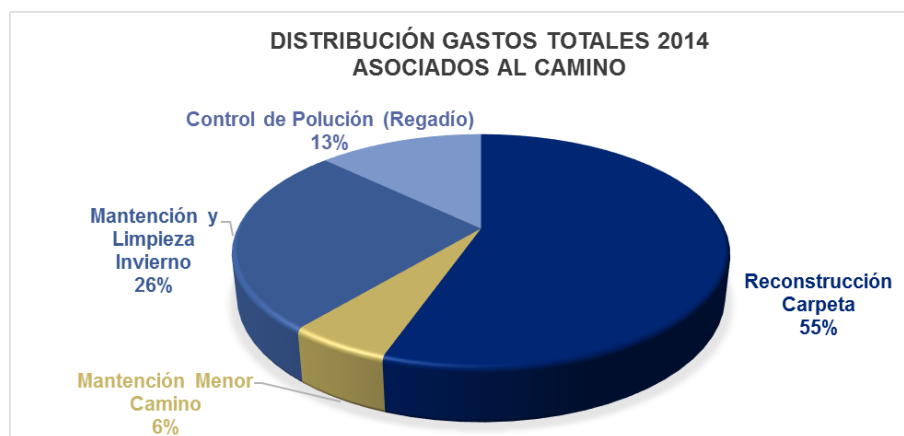


Gráfico 8. Distribución de gastos totales 2014, asociados al camino

Tal como se muestra en el gráfico 8, durante el 2014 el principal ítem de gasto fue la reconstrucción de la carpeta de rodado (55%), seguido por la mantenimiento y limpieza durante el período invernal (26%). El control de polución representa un 13% del gasto total asociado al camino, mientras que las mantenciones menores son un 6% del total.

3.1.5 Emisión de Material Particulado 2014

El tránsito en caminos no pavimentados representa una fuente lineal importante de emisión de material particulado a la atmósfera. La medición y el control de la polución generada, principalmente MP10 y MP2,5, es fundamental en cualquier ruta no pavimentada, y toma aún más énfasis en la minería, debido al marco regulatorio específico para faenas mineras.

En Los Bronces, se realizan al menos 2 mediciones aleatorias durante el mes (siempre que las condiciones climatológicas lo permitan), en todos los tramos del camino industrial, a través del método DustMate (Sección 2.3.2.c), generando reportes para la superintendencia de Operación Inverno y Caminos.

En la tabla 8, se tiene el registro mensual promedio del material particulado emitido a lo largo del camino industrial, durante el año 2014.

Tabla 8. Material particulado promedio en el camino industrial, 2014

MES	PM2,5 µg/m3	PM10 µg/m3
Feb-14	44	150
Mar-14	25	106
Abr-14	20	141
May-14	32	296
Jun-14	28	184
Jul-14	39	166
Ago-14	42	187
Sept-14	43	256
Oct-14	40	288
Nov-14	92	349
Dic-14	85	440
Ene-15	78	392
Promedio	47	246

En base a la tabla anterior, se tiene que el promedio anual de las mediciones es de 47 µg/m3 para el MP2,5 y de 246 µg/m3 para el MP10, lo que preliminarmente se encontraría por sobre la norma vigente, pero cabe destacar que estas mediciones están realizadas de manera móvil aleatoriamente (sin ninguna técnica ni frecuencia de muestreo durante el mes), por ende, no es representativa de las 24 horas que señala la ley vigente. Actualmente no hay una estación de monitoreo fija en Los Bronces que registre el MP anual real.

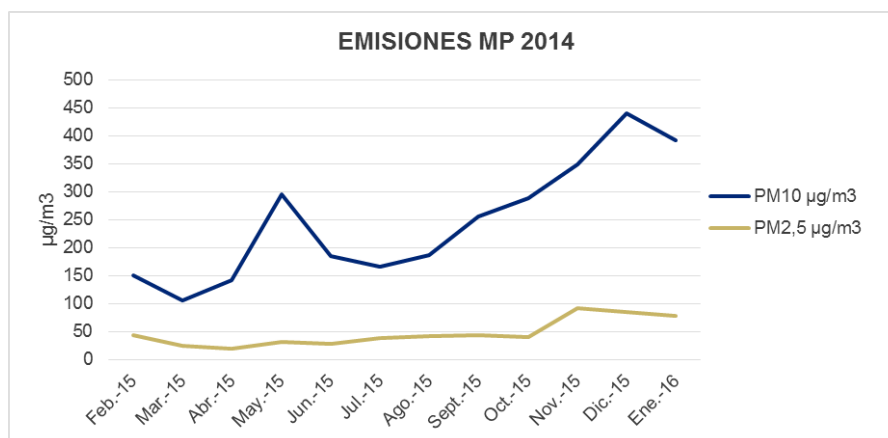


Gráfico 9. Comportamiento de la emisión de material particulado en 2014

En el gráfico 9, se muestra el comportamiento mensual de las emisiones de material particulado durante el año 2014, donde se puede observar que el material MP2,5 tiene una menor proporción, además de un comportamiento más estable en el tiempo, mientras que el MP10 tiene un comportamiento más variable, alcanzando un peak de 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y aumentando considerablemente desde septiembre en adelante, principalmente por los trabajos de reconstrucción post invierno que disponen material poco competente durante las obras.

3.1.6 Identificación de Oportunidades

En base a todo lo presentado en esta sección (3.1) y sus subsecciones, esto es la línea base de consumos y gastos del año 2014, se han identificado las siguientes oportunidades:

- Optimizar los recursos, principalmente maquinarias, para reducir gastos en reconstrucción de la carpeta de rodado.
- Reducir el consumo de agua destinada exclusivamente al control de polución y reconstrucción de la carpeta de rodado.
- Utilizar el agua destinada al riego del camino, para el procesamiento de minerales en la planta Los Bronces. Beneficiarse a través del costo de oportunidad, especialmente durante 2015 que se prevé un año seco.
- Reducir la emisión de material particulado, tanto MP2,5 como MP10, con el fin de lograr mejores niveles de seguridad e higiene para los trabajadores, y por otra parte, reducir el impacto ambiental.

En base a estas oportunidades se ha decidido realizar esta iniciativa que busca optimizar integralmente los recursos asignados para la mantención y reparación de la carpeta de rodado, y el control de polución, a través de la incorporación de la tecnología de supresión de polvo y estabilizador de camino apropiado para el caso de Los Bronces.

La solución de supresión de polvo para Los Bronces deberá ir enfocada en minimizar el costo de reconstrucción de la carpeta de rodado, además de reducir el consumo de agua, elemento que es de vital importancia para la operación, ya que a fines del 2014 se prevé y proyecta una escasez del vital elemento para el año 2015.

3.2 REVISIÓN DE SUPRESORES EN LA MINERÍA NACIONAL

En Chile, entre los años 2013 y 2014, se han realizado una gran cantidad de pruebas de supresores de polvo en la minería. A fines del 2014, se podían encontrar 15 empresas proveedoras de distintos supresores de polvo en el mercado nacional, cada una con distintas especificaciones y cualidades. Esto nos demuestra la relevancia que tiene el control de polución dentro de la minería nacional, y lo competitivo que se está tornando el mercado.

Los supresores de polvo del tipo bituminoso, principalmente emulsiones asfálticas, han sido las más utilizadas en las mineras líderes del país, esto se debe a sus buenos resultados en caminos que presentan precipitaciones durante el año, por sus propiedades de insolubilidad en agua. La principal desventaja de esta aplicación es su alto costo en relación a otras alternativas. Las minas que utilizan este tipo de supresor son: Los Pelambres, Andina, Carmen de Andacollo, Caserones, Esperanza, Collahuasi, Cerro Colorado y Teniente.

En cuanto a los estabilizadores o aglomerantes iónicos, son una solución económica para la generación de carpetas de rodado con una mayor capacidad de compactación. Las desventajas son que requiere una porción de arcillas mayor al 20%, lo que es escaso, y por otra parte, pierden su efectividad al estar en contacto con el agua. Se han realizado pruebas en: Los Pelambres, Radomiro Tomic, El Tesoro, Pascua Lama y Caserones.

Otra solución que ha sido probada a nivel nacional, son los supresores de polvo de polímeros sintéticos, los cuales tienen la ventaja de una fácil aplicación y mayor duración, pero que necesitan condiciones climáticas especiales: temperaturas no menores a 10°C y no tener riesgo de precipitaciones durante su proceso de secado. Se ha probado su aplicabilidad y eficiencia en: Minera Escondida, Los Bronces, Sierra Gorda, El Tesoro, Quebrada Blanca y El Soldado.

El Cloruro de magnesio, comúnmente llamado Bischofita, es uno de los elementos más utilizados para estabilizar y eliminar la polución de las rutas no pavimentadas. Tal como se mencionó en el marco teórico, es un estabilizador químico y agente de control de polvo, producido en forma 100% natural a partir de salmueras ricas en magnesio. En general sus resultados son óptimos en zonas áridas donde la probabilidad de precipitación es casi cero. Debido a su alta capacidad higroscópica, no se recomienda en zonas que tengan humedad, ya que puede generar problemas de seguridad por el resbalamiento y deterioro de la carpeta, principalmente por ablandamiento por humedad. Algunas minas que han utilizado este producto son: Cerro Colorado, Lomas Bayas, Chuquicamata, Radomiro Tomic y Spence.

3.3 DETERMINACIÓN DEL SUPRESOR ÓPTIMO PARA LOS BRONCES

Para determinar el supresor de polvo óptimo para el caso de Los Bronces, es necesario recurrir a distintas fuentes de información, impresiones y resultados en otras operaciones mineras respecto a los productos y servicios contratados, etc.

Para realizar esta revisión o estudio de benchmark es importante determinar qué minas tienen condiciones climáticas y ambientales similares a Los Bronces, esto es período invernal entre abril y septiembre, altura en torno a los 3000 msnm y litología o tipo de suelo similar.

Considerando lo anterior y en base a la información presentada en la sección 3.2 de este documento, se puede generar la tabla 9, que contiene un resumen de los distintos supresores usados por las principales minas en Chile durante el 2013 y 2014.

Tabla 9. Supresores utilizados por minas chilenas, durante el 2013 y 2014

Mina	Cloruro de Magnesio	Polímeros Sintéticos	Aglomerantes Iónicos	Bituminoso (Emulsiones)
Los Pelambres			X	X
Andina				X
Carmen de Andacollo				X
Caserones			X	X
Esperanza				X
Collahuasi				X
Cerro Colorado	X			X
Teniente				X
Radomiro Tomic	X		X	
El Tesoro		X	X	
Pascua Lama			X	
Minera Escondida		X		
Los Bronces		X		
Sierra Gorda		X		
Quebrada Blanca		X		
El Soldado		X		
Lomas Bayas	X			
Chuquicamata	X			
Spence	X			



Tal como se muestra en la tabla 8, Los Bronces usó polímeros sintéticos como supresores de polvo durante el año 2013, no cumpliendo las expectativas,

principalmente debido a no poder soportar las condiciones climatológicas imperantes durante el invierno.

Dentro de la tabla 9, las minas que presentan condiciones similares a Los Bronces en cuanto a operación invierno, tipo de suelo y altura, son Minera Los Pelambres de Antofagasta Minerals y Andina de Coldelco. Ambas minas han probado en sus caminos supresores de polvo del tipo bituminoso (emulsión), que si bien representa un alto costo, es eficiente en condiciones invernales.



Ilustración 20. Carpeta de rodado con supresor bituminoso, minera en Los Pelambres.

Dentro de las mineras más importantes del país la compañía Minera los Pelambres es la que cuenta con mayor experiencia en prueba de supresores de polvo, de acuerdo a la recopilación de datos, ha realizado pruebas con productos bituminosos y electroquímicos, logrando mejores resultados con soluciones bituminosas, en particular emulsiones asfálticas, debido a que resiste de mejor forma las precipitaciones (4 m anuales de nieve aproximadamente) y las bajas temperaturas, durante el invierno.

Por su parte, la mina Andina (vecina de Los Bronces), también ha realizado pruebas con productos bituminosos del tipo emulsión asfáltica, obteniendo buenos resultados. Según opiniones de expertos, para que su aplicación sea exitosa se debe ser estricto en cumplir el plan integral de mantenimiento del sistema, servicio que es proporcionado por una empresa externa, con el apoyo y coordinación del personal propio.

Si bien estas dos faenas, son similares a Los Bronces, y han tenido buenos resultados utilizando supresores del tipo orgánico bituminoso, no se puede tomar una decisión económica en base a experiencias.

Considerando lo anterior, y en base a la información presentada en el marco teórico (sección 2.4) de este documento, además de una investigación presentada en la revista Minería Chilena, se puede generar la tabla 10, que contiene información respecto a la eficiencia en control del polvo, considerando el impacto ambiental de cada supresor y el efecto funcional que cada uno genera sobre la operación.

Tabla 10. Eficiencia, impacto ambiental y efecto sobre la operación de los tipos de supresores

Tipo de Supresor	Eficacia en control de polvo e impacto ambiental	Efecto funcional sobre operación
Agua	50% (2 l/m ² mes) Lixivia componentes del suelo. Zonas áridas de alta salinidad cambian pH de napas subterráneas.	Recurso escaso. Sobre riego daña neumáticos OTR. Permite circulación inmediata. Genera barro.
Cloruro de Calcio	55%	Corrosión de vehículos, infraestructura vial y hormigón.
Cloruro de Magnesio	77% Contaminación de napas subterráneas por cloruro arrastrado por el agua a través del suelo. Altamente solubles. Modifican pH y salinidad del medio acuoso. Alta concentración salina puede ser tóxica para las plantas y seres vivos. Concentración por sobre los 400 ppm es tóxica para ciertas especies de peces, y sobre los 1.830 mg/l es mortal para microorganismos y crustáceos.	Seca gomas, caucho y revestimientos en equipos. Superficies resbaladizas cuando se humedecen (higroscópicos). No es complementario con riego de agua para controlar polvo.
No bituminosos (Lignosulfonato)	63%. 7.300 mg/l afecta peces y 2.500 mg/l puede afectar colon en roedores. Produce ulceración y pérdida de peso en animales pequeños. Reducción de la actividad biológica en el agua, debido a la contaminación por lignosulfonatos.	Con baja humedad y alta temperatura es más efectivo que cloruros. Mancha equipos y vehículos durante su aplicación.
No bituminosos (Aceites vegetales y melazas)	84%. Reducción de la actividad biológica producto de la decoloración del agua.	Mayoritariamente son higroscópicos. Se lavan con el agua y no impermeabilizan el camino.
Orgánicos Bituminosos (Emulsión asfáltica)	95% Gran capacidad impermeabilizante.	Considerado supresor de larga duración. Mancha vehículos durante aplicación. Alta resistencia al rodado y tensión de carga. Reduce ciclos de riego y permite reparación del camino sobre riego.
Polímeros sintéticos	40-50%. Incrementa la fuerza de tracción del suelo. Fuerza depende de un tiempo de curado.	No permite circulación inmediata.
Emulsión con polímero (promedio)	Inicial 96%, 3 meses 84%, Después de 11 meses 67%	No soporta alto tonelaje.
Estabilizador de suelo biocatalítico	Inicial 33%, después de 3 meses 0% La vegetación no se restablece en áreas tratadas.	Solo compacta. No permite reparación ni re- aplicación. Se debe rehacer una vez saturado o combinar con otro supresor.

Tal como se destaca en la tabla 10, uno de los supresores que presenta un menor impacto ambiental y con mayor eficiencia, es el supresor de tipo orgánico bituminoso, que resulta ser el mismo utilizado en minas similares a Los Bronces.

Cabe destacar que si bien es una de las mejores alternativas que ofrece el mercado, resulta ser una de las más costosas y tiene algunos impactos sobre la operación.

En base a la información presentada en esta sección, se recomienda la implementación y utilización del supresor de tipo orgánico bituminoso (emulsión), para el camino industrial de Los Bronces durante el año 2015.

Para su correcta implementación es fundamental mantener bajo control los impactos negativos sobre la operación, a través de un plan integral de mantenimiento del camino.

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL SUPRESOR DE POLVO

En base a la recomendación realizada a fines del 2014, se decidió implementar el sistema de supresión de polvo del tipo bituminoso y generar un plan integral de mantención de caminos que se adapte a las recomendaciones de la empresa contratista que provee la tecnología.

La implementación del sistema comenzó en febrero del 2015, realizando una campaña para aplicar el supresor a lo largo de los 30 km de camino industrial de forma tónica, haciéndose cargo la empresa colaboradora con el apoyo de la superintendencia de Operación Invierno y Caminos.

El producto utilizado es un supresor de polvo bituminoso estándar dentro de lo que ofrece el mercado, el cual cumple con todas las normas de seguridad y medioambientales vigentes en la legislación actual, según evidencia y certificaciones presentadas por la empresa contratista.

La aplicación del producto requiere del uso de agua (mucho menor que el método tradicional de regadío). El consumo de agua y de emulsión, además de la dosificación utilizada en el camino industrial de Los Bronces, durante todo el año 2015, se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Consumo de agua, consumo de emulsión y dosificación aplicada durante el 2015

Mes	Insumos para Supresión de Polvo		Litros Emulsión /m ²
	Agua (m ³)	Emulsión (m ³)	
Feb-15	463	17	0.4
Mar-15	1052	28	0.6
Abr-15	1135	35	1.5
May-15	1063	67	2.8
Jun-15	1155	55	2.5
Jul-15	556	24	0.7
Ago-15	305	21	0.5
Sept-15	344	21	0.6
Oct-15	851	49	1.6
Nov-15	569	31	0.8
Dic-15	878	50	1.4
Ene-16	890	50	1.3
Total	9261	448	1.2

Tal como se observa en la tabla 11, durante el año 2015 se tuvo un consumo total de agua, dedicado exclusivamente a la supresión de polvo, de 9.260 m³. Por su parte, el consumo total de emulsión ascendió a los 448 m³ y la dosificación promedio del producto sobre el camino fue de 1.2 litros de emulsión por cada metro cuadrado de camino, lo que está dentro de los parámetros normales, según la empresa que proporciona el servicio.

Considerando la información presentada en la tabla 11, se puede generar el perfil de consumo de insumos durante el año 2015, tal como se muestra en el gráfico 10.

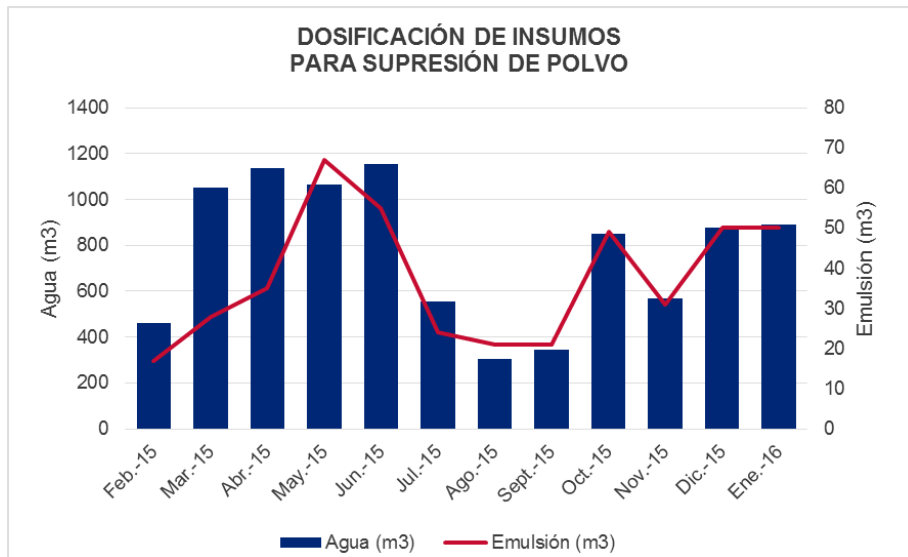


Gráfico 10. Comportamiento de la dosificación de insumos para la mezcla supresora

Tal como se muestra en el gráfico 10, la dosificación de ambos insumos (agua y emulsión) fue proporcional durante casi todo el año. Cabe destacar que a mediados de febrero comenzó la campaña, es por eso que ese presenta un menor consumo tanto de agua como de emulsión, sin embargo en marzo y abril aumentó considerablemente el consumo principalmente de agua, esto fue para lograr un mejor acabado en la aplicación inicial de todo el camino.

Es importante considerar que durante la primera parte del 2015 se tuvo una importante sequía que se prolongó hasta fines de junio, aumentando las probabilidades de tener exceso de polvo en la ruta. Esta prueba fue superada por el supresor de polvo tipo bituminoso, pero implicó un alto consumo de insumos para lograr la estabilización del camino, tal como se muestra en ilustración 21.



Ilustración 21. Camino industrial de Los Bronces estabilizado con supresor de polvo bituminoso

La prolongada sequía dio paso a un invierno tardío, que llegó a mediados de julio presentando condiciones adversas severas, incluyendo uno de los temporales más relevantes de los últimos 10 años en Los Bronces, tal como se muestra en el gráfico 11.

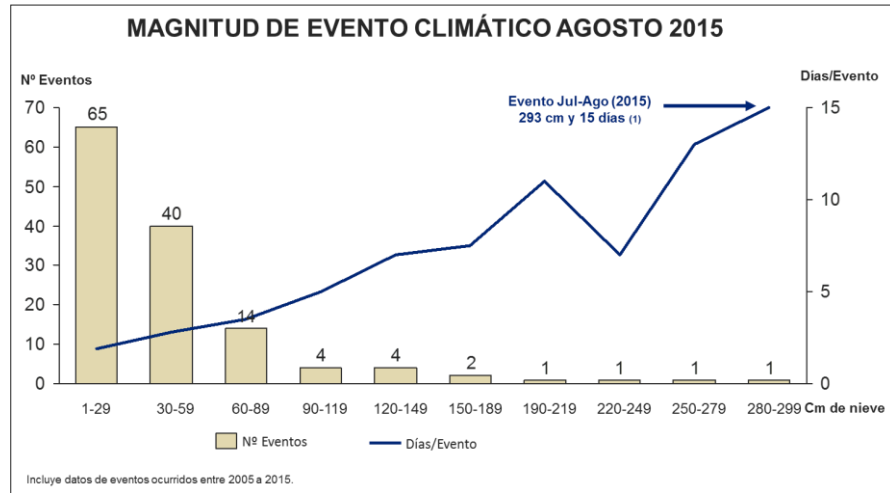


Gráfico 11. Magnitud de evento climático agosto 2015

Frente a esta situación, la superintendencia de operación invierno y caminos, se vio en la obligación de contratar mayor cantidad de maquinaria y mano de obra especializada, para poder realizar el despeje oportuno del camino industrial y de la operación minera cubiertos por la nieve durante el temporal, tal como se muestra en las ilustraciones 22 y 23.



Ilustración 22. Condición de caminos mina post temporal

Además el crudo invierno entre fines de julio y principios de octubre, disminuyó el uso del sistema supresor y sus insumos asociados, reemplazándolo principalmente por labores de mantenimiento de caminos y limpieza de invierno, que debieron realizarse de manera intensa en el camino industrial, para no impactar la reactivación de la operación post temporal.



Ilustración 23. Despeje de nieve en el camino industrial

Durante todo el 2015, se tuvo una caída de nieve acumulada de 8,61 m, lo que está por sobre el promedio anual y alejado de los 4,86 m de nieve precipitados durante el 2014. Esta mayor cantidad de nieve, sumada al retraso del término de la temporada invernal, produjo que la campaña de reparación y mantenimiento de camino se retrasará aproximadamente 2 meses, comenzado recién el mes de Noviembre.

3.5 RESULTADOS DE LA INICIATIVA

A continuación se detallarán los consumos de agua y los gastos asociados a la mantención y reparación de caminos durante el año 2015, considerando la implementación del supresor de polvo tipo bituminoso, a lo largo de toda la extensión de camino industrial de Los Bronces.

Los consumos y gastos, estarán dispuestos en la misma estructura en la cual fueron presentados los resultados 2014, con el fin de facilitar la lectura del documento y la discusión o comentarios asociados a cada uno de los resultados obtenidos.

3.5.1 Consumo de Agua 2015

Para el proceso de mantención y control de polución del camino industrial 2015, se mantuvo un consumo anual de agua según lo indicado en la tabla 12.

Tabla 12. Consumo anual de agua 2015, asociado al camino

Consumo Agua (m3)	2015												2016	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan		
Construcción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1600	2800	1853	6253	
Control de Polución	463	1052	1135	1063	1155	556	305	344	851	569	878	890	9261	
Total	463	1052	1135	1063	1155	556	305	344	851	2169	3678	2743	15514	

Tal como se muestra en la tabla 12, durante el año 2015 se tuvo un consumo de agua para control de polución de 9.261 m³ de agua, mientras que para la construcción y reparación de carpeta se tuvo un consumo de 6.253 m³ de agua. Llegando a un total anual de 15.514 m³ de agua consumidos y dedicados exclusivamente al camino industrial.

En base a la tabla 12 se puede graficar el perfil de consumo anual de agua para el año 2015, tal como se muestra en el gráfico 12.

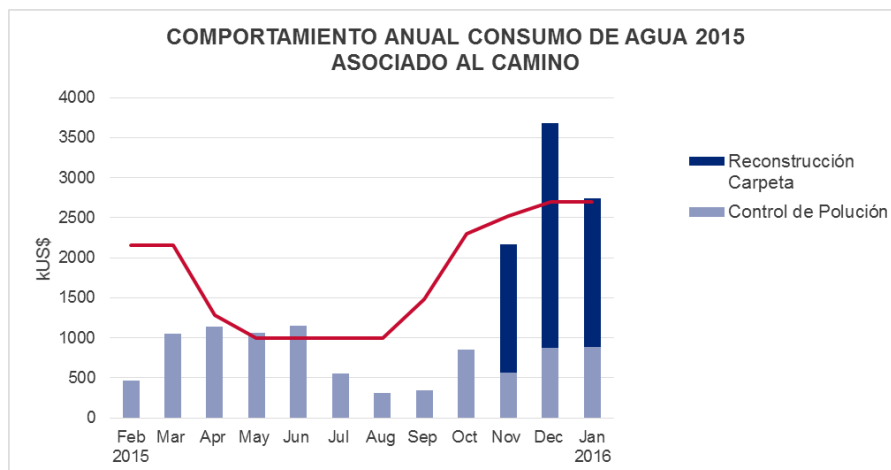


Gráfico 12. Consumo de agua 2015, asociado al camino

Tal como se muestra en el gráfico 12, durante el 2015 se dedicó menor cantidad de agua estable durante los períodos con menos precipitaciones, considerando los meses de marzo, abril, mayo y junio. Esto debido principalmente a que la emulsión supresora entregó excelentes resultados en el período seco.

Es importante señalar que el consumo de agua para la reconstrucción de carpeta se dispara a partir de noviembre (campaña retrasada por el invierno), pero aun así dedica mucho menor cantidad de agua respecto al 2014, y no se escapa de manera abrupta del presupuesto.

Al terminar el año, se logra dar cumplimiento al presupuesto anual de consumo de agua establecido para el 2015 (21.300 m³), logrando un consumo real de 15.514 m³ de agua, lo que representa un déficit de consumo de 27%, respecto a lo presupuestado. Esto tiene directa relación con la aplicación del supresor de polvo y el bajo consumo de agua que se dedica para realizar la mezcla del producto.

La distribución porcentual de los 15.514 m³ de agua, dedicados exclusivamente al camino industrial, se muestra en el gráfico 13.

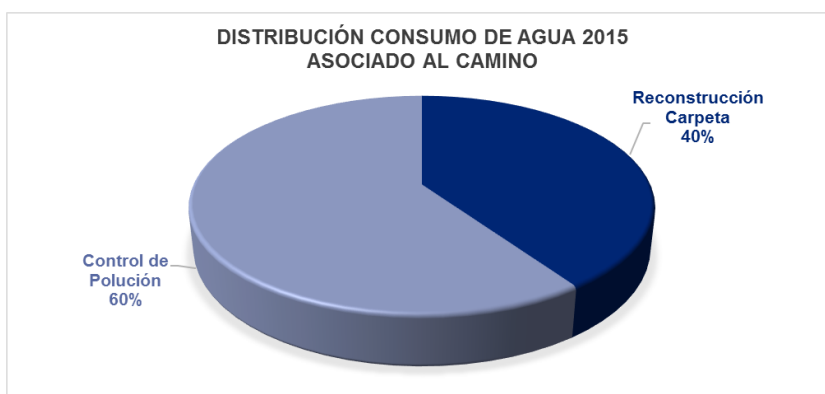


Gráfico 13. Distribución de consumo de agua 2015, asociado al camino

La mayor parte del agua dedicada y consumida en el camino industrial, sigue siendo para controlar la polución (60%), pero disminuyó un 15% respecto al 2014, mientras que el resto del recurso hídrico (40%) es destinado a la reparación de la carpeta de rodado, aumentando respecto al 2014 un 15%.

Considerando los consumos de agua de los años 204 y 2015, presentados en las secciones 3.1.1 y 3.5.1, se tiene la tabla 13.

Tabla 13. Consumos anuales de agua, 2014 vs 2015.

Consumo Agua (m3)	2014	2015
Construcción Carpeta	12600	6253
Control de Polución	37800	9261
Total	50400	15514

En base a la tabla 13, se puede generar el gráfico 14, que muestra la importante brecha de consumo de agua entre los años 2014 y 2015.

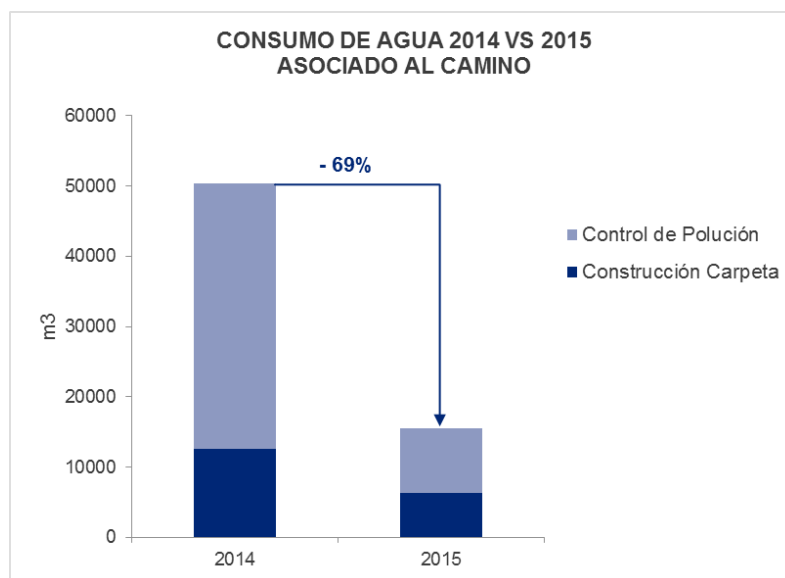


Gráfico 14. Consumo de agua asociado al camino, 2014 vs 2015

Durante el 2015 se consumieron 34.886 m³ de agua menos que el 2014, lo que representa una disminución de 69%, tanto para las labores de construcción de carpeta de rodado como para el control de la polución. Esta reducción en el consumo de agua, está asociada a la implementación del supresor de polvo tipo bituminoso.

3.5.2 Gasto en Maquinaria de Mantenimiento 2015

Como antecedente general, es importante recordar que para considerar la reparación de la carpeta de rodado, se toma como criterio que se debe tener por lo menos 18 cm de material competente in situ, en cada uno de los tramos, para no tener que realizar aporte de material en la base de camino. La revisión de este criterio operativo se realiza a través de pruebas de laboratorio, a lo largo de todo el camino industrial de Los Bronces.

Para el año 2015, luego de realizar las pruebas de laboratorio, se encontró que entre los km 17 y 30 del camino industrial, se tenían más de 18 cm de material competente in situ, por lo cual no fue necesario la reconstrucción de carpeta de toda la extensión camino (30 km) como en 2014, sino que tan solo 17 km. Estos resultados son atribuibles al uso de la emulsión supresora de polvo, que presenta características de resistencia al agua, entregando una mayor resistencia del camino frente a condiciones climatológicas adversas.

La reconstrucción de la carpeta va asociada a un mayor costo, ya que se hace necesario la compra de material de base del camino, y su transporte dentro de los 17 km del camino, para así construir una nueva carpeta de rodado de al menos 25 cm de

espesor. Sin embargo, cabe destacar que esta hace muchos años que no se reparaban tan pocos kilómetros de camino post periodo invernal.

Contextualizado lo anterior, se tienen los costos asociados a maquinarias de reparación y mantenimiento de caminos durante el año 2015, presentados en la tabla 14.

Tabla 14. Gastos de maquinaria 2015, asociados a la reparación y mantenimiento del camino industrial.

Costos Maquinaria (kUS\$)	2015											2016	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	268	285	551	1104
Mantenimiento Menor Camino	120	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	232
Mantenimiento y Limpieza Invierno	0	0	136	156	148	310	475	430	290	0	0	0	1945
Total	120	112	136	156	148	310	475	430	290	268	285	551	3281

Tal como se muestra en la tabla 14, el costo asociado a la reconstrucción de carpeta fue de kUS\$ 1.104, para la campaña de los 17 km del camino industrial, reduciéndose en kUS\$ 908 respecto al año 2014 (kUS\$ 2.012). El costo total de maquinaria, incluyendo las tres principales labores asciende a kUS\$ 3.281, un 3% mayor al año 2014, atribuible al alto costo en maquinarias para la mantención y limpieza durante el período invernal.

En base a la tabla 14 se puede graficar el perfil de gasto anual en maquinaria para el año 2015, tal como se muestra en el gráfico 15.

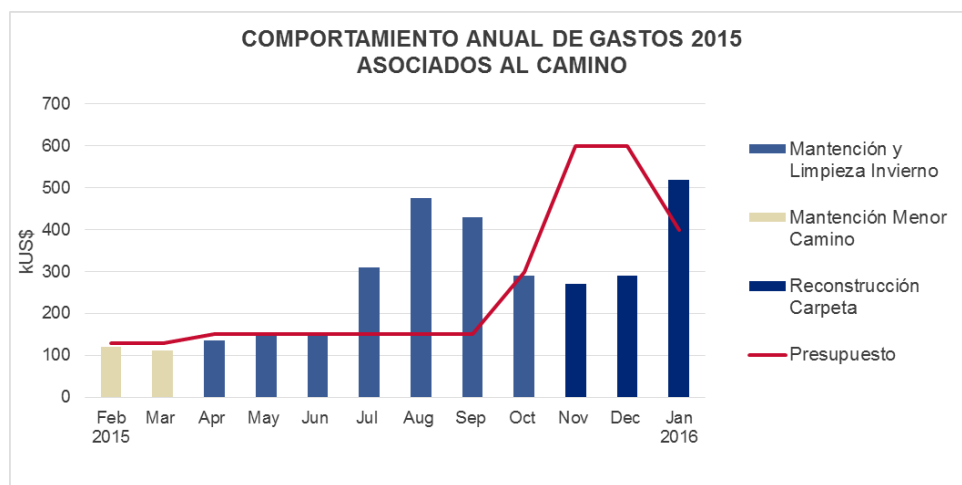


Gráfico 15. Gastos en maquinaria 2015, asociados al camino

Tal como se muestra en el gráfico 15, durante los meses de febrero a junio se dio cumplimiento al presupuesto, considerando una baja intensidad de gasto y estable, dado que solo se realizan mantenciones menores y apoyo a la aplicación del supresor.

Es relevante señalar que durante el periodo invernal, esto es julio, agosto y noviembre, existe un importante incumplimiento del presupuesto, debido principalmente a las fuertes condiciones climatológicas adversas durante el invierno más intenso de los

últimos 10 años, lo que significó un aumento en el gasto de maquinarias externas para las labores de mantenimiento y limpieza del camino post temporal.

Cabe destacar que durante el período post invierno, esto es octubre, noviembre y diciembre, se tuvo un menor gasto asociado a la reconstrucción de la carpeta de rodado respecto al presupuesto. Este ahorro es atribuible al uso de la emulsión supresora de polvo, que presenta características de resistencia al agua, entregando una mayor resistencia del camino frente a condiciones climatológicas adversas, por ende entregándolo en mejores condiciones una vez finalizado el invierno.

Al terminar el año, no se da cumplimiento al presupuesto anual de gastos para maquinaria asociada al camino industrial establecido para el 2015 (kUS\$ 3.060), logrando un gasto real de kUS\$ 3.281, lo que representa un gasto extra de 7%, respecto a lo presupuestado. Esto tiene directa relación con el aumento del gasto asociado a máquinas y servicios externos para las labores de mantenimiento y limpieza del camino post temporal.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 3.281 gastados en maquinaria dedicada exclusivamente al mantenimiento y reparación del camino industrial de Los Bronces, se distribuyen porcentualmente como se muestra en el gráfico 16.

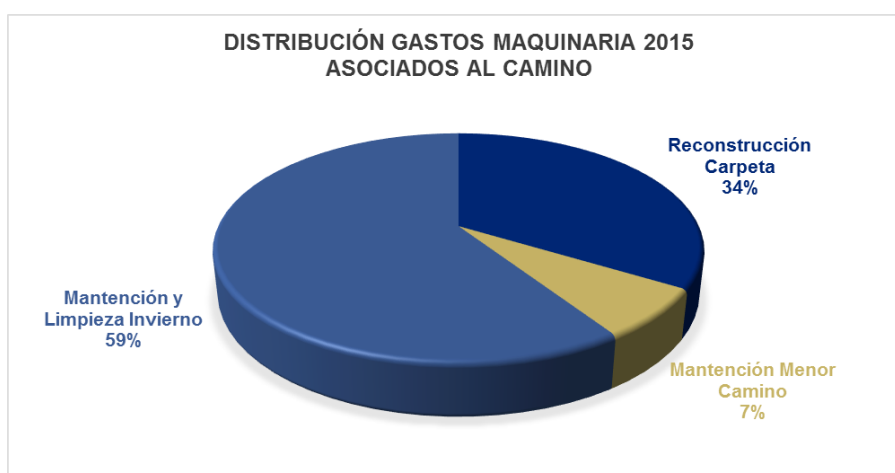


Gráfico 16. Distribución de gastos de maquinaria 2014, asociado al camino

En línea con lo mencionado durante esta sección, la mayor proporción de gasto por maquinaria está asociada a la mantenimiento y limpieza en período invernal (59%), seguido por la reconstrucción de la carpeta (34%), mientras que el resto está destinado a mantenimientos menores del camino (7%).

3.5.3 Gasto en Agua y Control de Polución 2015

El consumo de agua anual detallado en la sección 3.5.1, tiene asociado una tarifa de US\$ 2 por el metro cúbico de agua industrial. Aplicando la tarifa al consumo del año 2015, se obtiene el perfil de gasto del año 2015 contenido en la tabla 15.

Tabla 15. Gastos de agua y control de polución 2015, asociados al camino industrial

Costo Agua (kUS\$)	2015											2016	Total	
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan		
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	4	13
Control de Polución	1	2	2	2	2	1	1	1	2	1	2	2	2	19
Arriendo de Aljibes	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total	1	2	2	2	2	1	1	1	2	4	7	5	31	

Tal como se muestra en la tabla 15, el costo asociado al consumo de agua para reconstrucción del camino y control de la polución fue de kUS\$ 31. Cabe destacar que al usar el supresor de polvo, se eliminó el arriendo de los camiones aljibes que estaban dedicados exclusivamente a la humectación del camino.

Por su parte, se tiene el gasto incurrido durante el año 2015 en la utilización de la emulsión supresora de polvo, detallado en la tabla 16.

Tabla 16. Gastos en control de polución (supresor tipo emulsión) 2015, asociados al camino industrial

Costo Supresor de Polvo (KUS\$)	2015											2016	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	
Control de Polución	29	36	34	94	119	79	79	80	78	122	112	86	948

En cuanto a los costos de aplicación del supresor, esto quiere decir, el costo de la emulsión más el costo de equipos y mano de obra para aplicarlo, es en promedio KUS\$ 79 /mes, alcanzando un gasto total anual de KUS\$ 948

En base a la tablas 15 y 16, se puede graficar el perfil de gasto anual en agua y control de la polución para el año 2015, tal como se muestra en el gráfico 17.

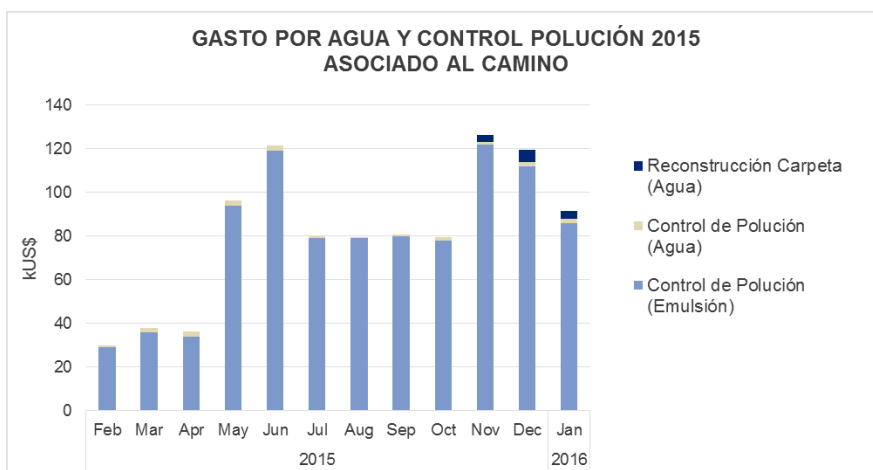


Gráfico 17. Gasto por agua y control de polución 2015, asociado al camino

Tal como se muestra en el gráfico 17, el gasto se dispara en aquellos meses en los cuales se consumió mayor cantidad de emulsión supresora de polvo. El gasto asociado al agua es marginal y casi nulo durante el invierno.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 979 gastados en agua y control de polución (con el uso de supresor), se distribuyen como se muestra en el gráfico 18.

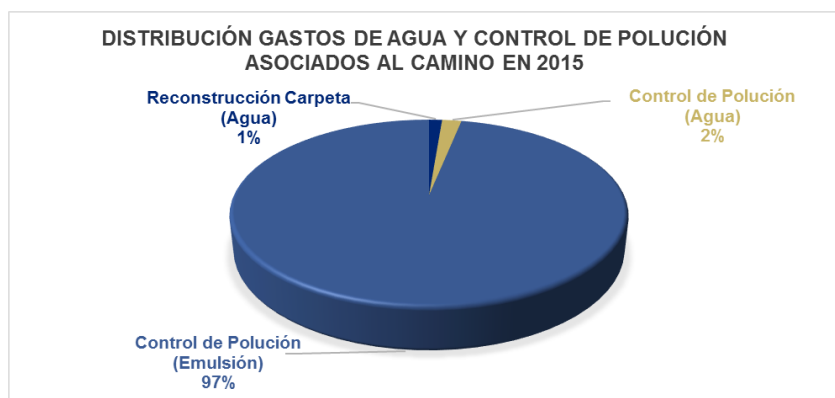


Gráfico 18. Distribución de gastos de agua y control de polución 2015

Cabe destacar que para el año 2015 el principal ítem de gasto para el control de polución fue la emulsión supresora de polvo. El gasto asociado al agua es marginal, tanto para la reconstrucción de la carpeta como para el control de polución.

3.5.4 Gasto Total Camino 2015

En base a los antecedentes presentados en las secciones 3.5.1, 3.5.2 y 3.5.3, se puede generar un resumen de los gastos totales asociados a la reconstrucción,

mantención y control de polución en el camino industrial de Los Bronces. En la tabla 17, se presentan los gastos totales por ítem durante el año 2015.

Tabla 17. Gastos totales 2014, asociados al camino industrial

Costos Totales (kUS\$)	2015											2016	Total
	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	
Reconstrucción Carpeta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	271	291	520	1082
Mantención Menor Camino	120	112	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	232
Mantención y Limpieza Invierno	0	0	136	156	148	310	475	430	290	0	0	0	1945
Control de Polución (Supresor)	30	38	36	96	121	80	80	81	80	123	114	88	967
Total	150	150	172	252	269	390	555	511	370	394	404	608	4225

Tal como se muestra en la tabla 17, el costo anual total del camino industrial de Los Bronces fue de kUS\$ 4.255, considerando las labores de reconstrucción de la carpeta de rodado, mantenciones menores, mantención y limpieza en invierno y control de polución durante todo el año a través del uso de supresor de polvo tipo emulsión bituminosa.

En base a la tabla 17 se puede graficar el perfil de gasto anual en agua y control de la polución para el año 2015, tal como se muestra en el gráfico 19.

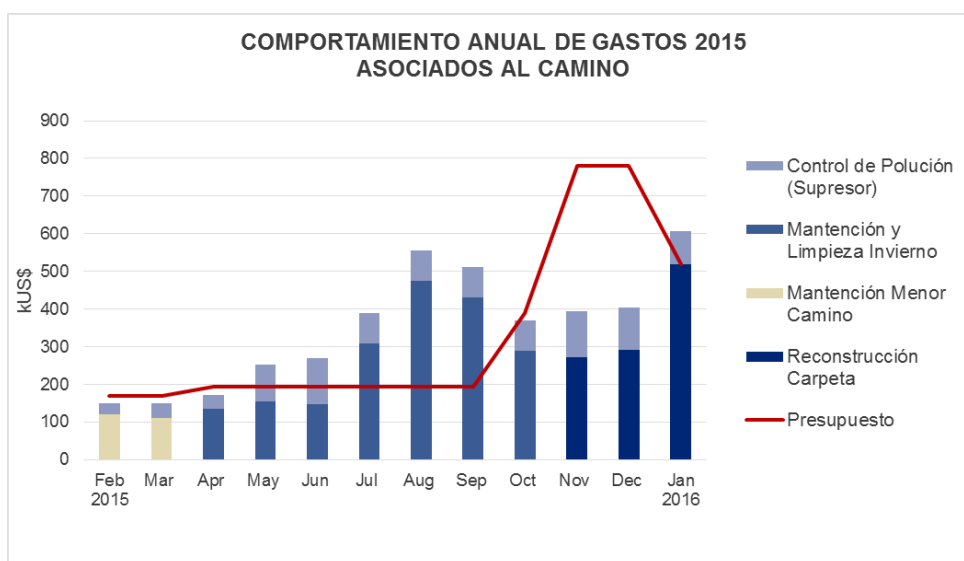


Gráfico 19. Gastos totales 2015, asociados al camino

Durante los meses de febrero a abril se dio cumplimiento al presupuesto, considerando una baja y estable intensidad de gasto, dado que solo se realizan mantenciones menores y apoyo a la aplicación del supresor. Durante mayo y junio, el leve incumplimiento del presupuesto se generó por la mayor cantidad de emulsión dosificada al camino.

Es relevante señalar que durante el periodo invernal, esto es julio, agosto y noviembre, existe un importante incumplimiento del presupuesto, debido principalmente

a las fuertes condiciones climatológicas del invierno más intenso de los últimos 10 años en Los Bronces, lo que significó un aumento en el gasto de maquinarias externas para las labores de mantenimiento y limpieza del camino.

Durante el período post invierno, esto es octubre, noviembre y diciembre, se tuvo un menor gasto asociado a la reconstrucción de la carpeta de rodado respecto al presupuesto. Este ahorro es atribuible al uso de la emulsión supresora de polvo, que presenta características de resistencia al agua, entregando una mayor cohesión al camino frente a condiciones climatológicas adversas.

Al terminar el año, no se da cumplimiento al presupuesto 2015 establecido para gastos asociados al camino industrial (kUS\$ 3.978), logrando un gasto real de kUS\$ 4.255, lo que representa un gasto extra de 6%, respecto a lo presupuestado. Esto debido principalmente al aumento de labores de mantenimiento y limpieza durante el invierno, lo que implicó tener que contratar mayor cantidad de servicios externos, tal como se mencionó anteriormente.

Finalmente, se tiene que los kUS\$ 4.255 gastados en el mantenimiento, reparación, limpieza y control de polución del camino industrial de Los Bronces, se distribuyen porcentualmente como se muestra en el gráfico 20.

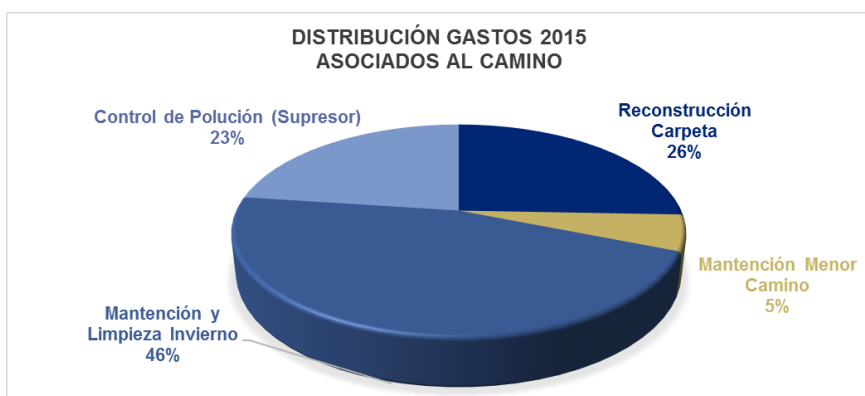


Gráfico 20. Distribución de gastos totales 2015, asociados al camino

Tal como lo indica el gráfico 20, durante el 2015 el principal ítem de gasto fue la mantenimiento y limpieza invierno (46%), seguido por la reconstrucción de la carpeta (26%). El control de polución representa un 23% del gasto total asociado al camino, mientras que las mantenciones menores son un 5% del total.

3.5.5 Emisión de Material Particulado 2015

Al igual que el año pasado, durante el 2015 se realizaron al menos 2 mediciones aleatorias durante cada (siempre que las condiciones climatológicas lo permitan), en todos los tramos del camino industrial, a través del método DustMate (Sección 2.3.2.c), generando reportes para la superintendencia de Operación Inverno y Caminos.

En la tabla 18, se tiene el registro mensual promedio del material particulado emitido a lo largo del camino industrial, durante el año 2015.

Tabla 18. Material particulado promedio en el camino, 2015

MES	PM2,5 µg/m ³	PM10 µg/m ³
Feb-15	32	105
Mar-15	11	74
Abr-15	9	99
May-15	18	155
Jun-15	15	129
Jul-15	21	116
Ago-15	23	131
Sept-15	14	57
Oct-15	24	155
Nov-15	22	131
Dic-15	78	316
Ene-16	48	157.5
Promedio	26	135

En base a la tabla anterior, se tiene que el promedio anual de las mediciones es de 26 µg/m³ para el MP2,5 y de 135 µg/m³ para el MP10, lo que se encuentra bajo los límites que establece la norma vigente.

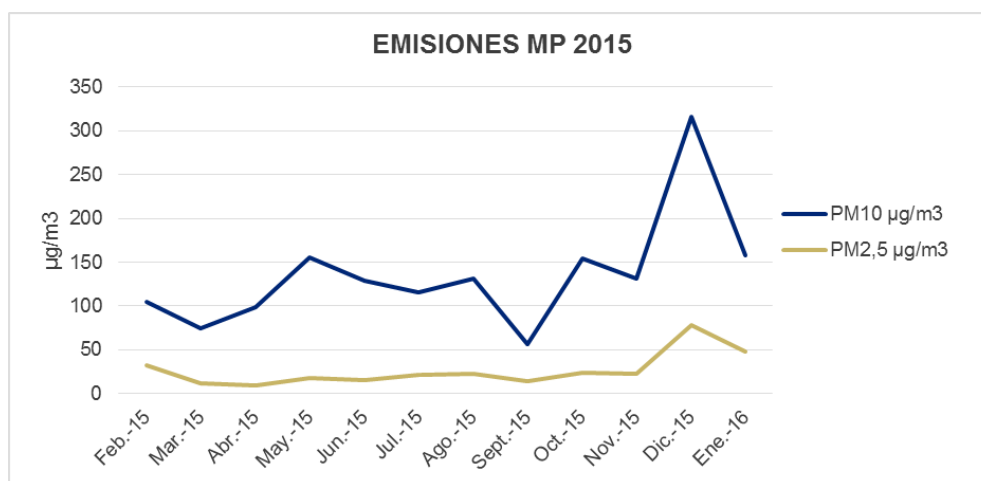


Gráfico 21. Comportamiento de la emisión de MP en 2015

En el gráfico 21, se muestra el comportamiento mensual de las emisiones de material particulado durante el año 2015, donde se puede observar que el material MP2,5 tiene una menor proporción, además de un comportamiento más estable en el tiempo, mientras que el MP10 tiene un comportamiento más errático alcanzando un peak de 316 µg/m³ variable y aumentando considerablemente en diciembre, debido a los trabajos de reconstrucción de carpeta y presencia de material poco competente durante las obras.

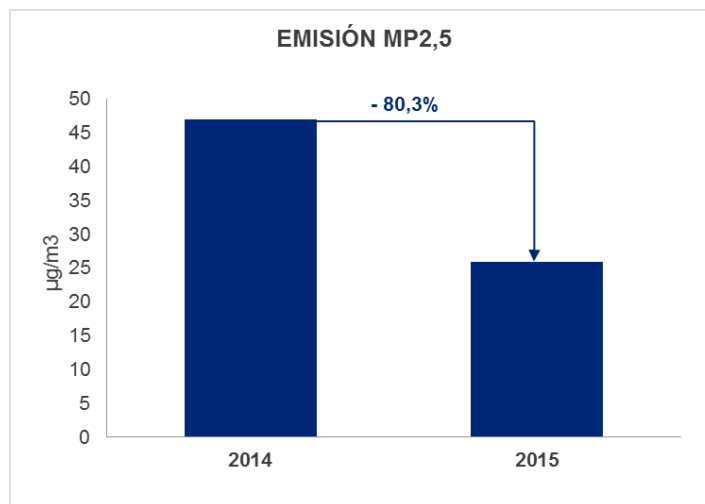


Gráfico 22. Comparación de la Emisión de MP2,5, 2014 vs 2015

Tal como se muestra en el gráfico 22, las emisiones de MP2,5 promedio disminuyeron en un 80,3% respecto al año 2014, luego de la aplicación de supresor de polvo tipo bituminoso.

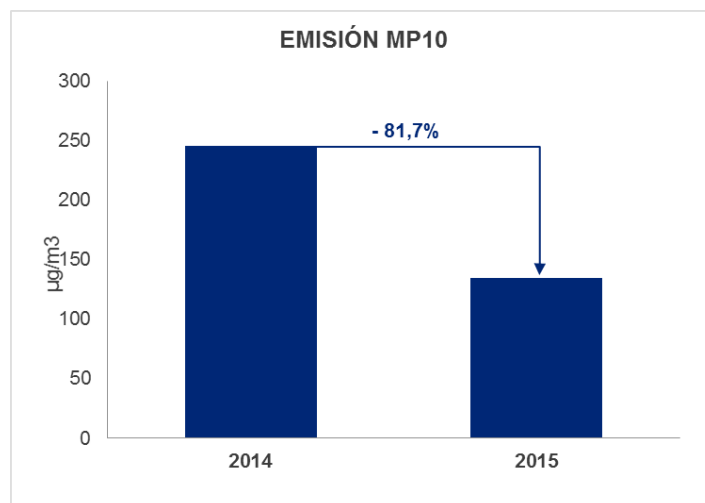


Gráfico 23. Comparación de la Emisión de MP10, 2014 vs 2015

Por su parte, y tal como se muestra en el gráfico 23, las emisiones de MP10 promedio disminuyeron en un 81,7% respecto al año 2014.

Estos resultados representan los excelentes resultados que permite alcanzar el uso del supresor de polvo bituminosos (emulsión), entregando caminos libres de polvo, logrando mejores condiciones laborales para los trabajadores de la faena y las comunidades aledañas, aumentando la seguridad e higiene en la operación y reduciendo además el impacto ambiental.

3.6 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En base a los resultados e información presentada en la sección 3.5 de este trabajo, se realizará una evaluación económica para medir el impacto de la implementación del nuevo sistema de supresión de polvo en Los Bronces, respecto al caso base (año 2014, sin uso de supresor).

Esta evaluación estará enfocada en el ahorro generado por la implementación de la iniciativa, abarcando principalmente los objetivos establecidos:

- Disminución del gasto asociado al agua para la humectación del camino.
- Disminución del gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado.

La evaluación económica de esta iniciativa es fundamental para tomar la decisión de seguir con la alternativa de supresión de polvo, evaluar otras alternativas o volver al regadío tradicional de agua con camiones aljibes.

3.6.1 Impacto Económico del Uso del Supresor

Para realizar esta evaluación se utilizará el costo del consumo de agua. La tarifa o costo del metro cúbico de agua industrial en Los Bronces es de US\$ 2, tal como fue mencionado en la sección 3.1.3 de este documento. Este costo se compone de US\$ 1, que es el costo promedio de que un proveedor descargue 1 m³ agua en el Tranque de la planta Las Tórtolas 1, más US\$ 1 que es el costo asociado a la energía requerida para subir ese metro cúbico de agua, desde Las Tórtolas hasta Los Bronces, a través del sistema de bombeo existente.

En base a los resultados presentados el año 2015, en la sección 3.5, y la línea base definida, en la sección 3.1, se puede generar la tabla 19 que muestra el resumen del gasto incurrido ambos años, considerando el uso de supresor y el método de humectación tradicional.

Tabla 19. Impacto económico del uso del supresor de polvo

Gastos Totales (kUS\$)	2014	2015
	S/supresor	C/Supresor
Reconstrucción de la Carpeta	2037	1117
Maquinaria	2012	1104
Agua	25	13
Control de Polución	476	967
Arriendo Aljibes (Humectación Camino)	400	0
Agua	76	19
Aplicación del Supresor (Emulsión)	0	948
Total	2513	2084

Tal como se puede apreciar en la tabla 19, se tiene que el uso de supresor de polvo (emulsión) genera un beneficio neto de KUS\$ 921 al año, considerando el ahorro en reconstrucción de la carpeta de rodado, disminuyendo un 45% su gasto respecto a la línea base.

Por su parte, el control de la polución utilizando la emulsión supresora de polvo, genera un aumento del gasto en KUS\$491, lo que representa un incremento del 103% respecto al año 2014.

La evolución de la proporción del gasto se muestra en el gráfico 24.

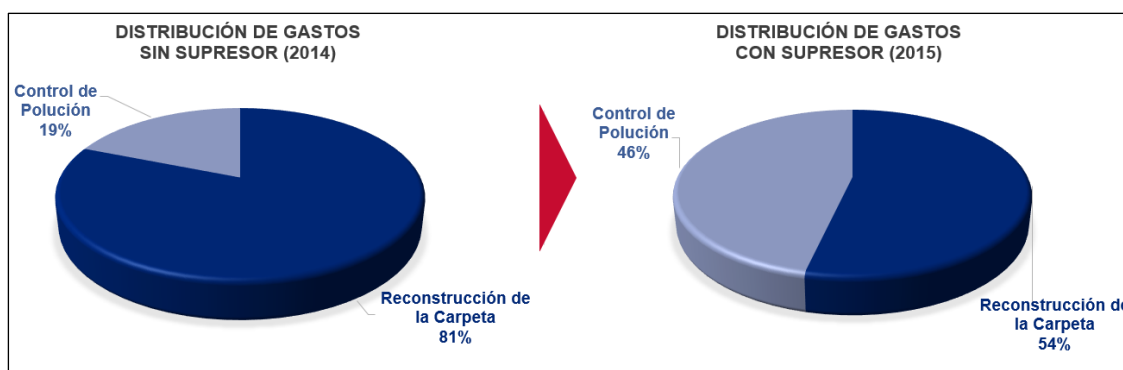


Gráfico 24. Evolución de la distribución del gasto 2014 vs 2015

La porción de gasto dedicada a la reconstrucción de la carpeta se redujo desde un 81% en 2014, hasta un 54% en 2015 con el uso del supresor de polvo. Por su parte, el gasto incurrido en el control de la polución aumentó su protagonismo desde un 19% en 2014, hasta un 46% en 2015.

Finalmente, se tiene que el uso de supresor de polvo (emulsión) genera un beneficio neto de KUS\$ 429 al año, lo que representa una disminución del 17% del gasto en reconstrucción de la carpeta y control de la polución, respecto a la línea base (año 2014).

3.6.2 Costos del Uso del Supresor

Para realizar un análisis del costo anual del supresor, es necesario realizar la relación entre el gasto incurrido y la superficie total en la cual fue aplicado el producto. Considerando las dimensiones del camino industrial de Los Bronces, se tiene una superficie de aproximadamente 341.000 m² de camino no pavimentado donde es aplicable la emulsión.

En base a lo anterior, y considerando la información contenida en la tabla 19, se puede generar los gráficos 25 y 26.

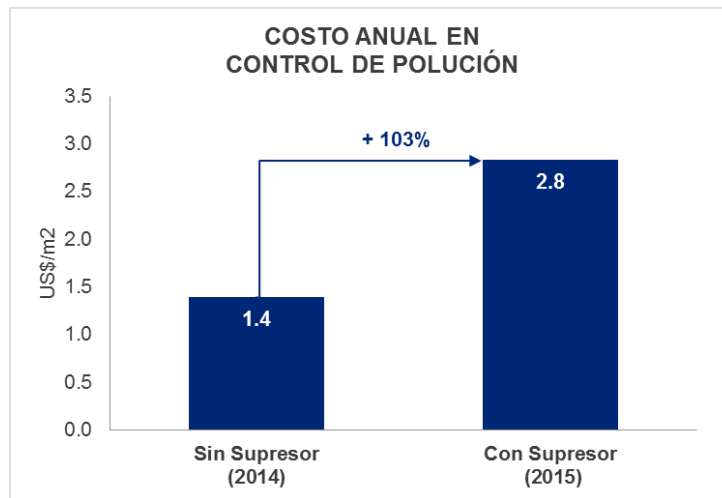


Gráfico 25. Costo anual en control de polución, 2014 vs 2015

Tal como se expone en el gráfico 25, el costo anual en control de polución aumentó un 103%, desde 1.4 a 2.8 US\$/m² de camino no pavimentado. Esto tomando en cuenta que el servicio contratado para la aplicación del supresor, es un contrato que supera en valor a la humectación del camino o método tradicional.

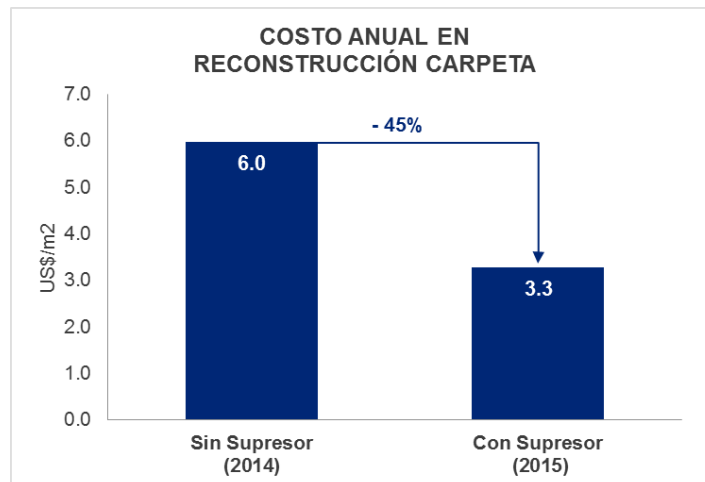


Gráfico 26. Costo anual en reconstrucción de carpeta, 2014 vs 2015

Por su parte, el costo anual en reconstrucción de la carpeta de rodado disminuyó desde 6.0 a 3.3 US\$/m² de camino no pavimentado. Debido principalmente a la reducción de kilómetros a reparar, dado el buen estado del camino post invierno, atribuible al uso del supresor.

3.6.3 Análisis de Sensibilidad del Supresor

Si bien el supresor genera un beneficio económico para la mina Los Bronces, es importante analizar hasta qué punto es rentable la aplicación de la emulsión en el camino. Para esto es fundamental determinar a qué precio y volumen el servicio de supresión de polvo se vuelve antieconómico para el caso de Los Bronces.

Para esto es necesario revisar el gasto anual (US\$) asociado al servicio de supresión de polvo, y realizar el cruce con el volumen (m³) de emulsión utilizada durante al año. Así se tiene lo siguiente:

- Volumen anual: 448 m³
- Gasto Anual: kUS\$ 948

Por ende el costo de emulsión supresora de polvo, incluyendo todos los servicios asociados a la aplicación del producto, es de 2.116 US\$/m³.

El punto en el cual el beneficio de usar el servicio de supresión de polvo se hace igual a cero, es cuando el gasto anual sea igual o mayor al gasto del año 2014, esto es kUS\$ 2.513. Asumiendo que durante el año se consumirá el mismo volumen (448 m³) de emulsión, se puede generar una tabla de sensibilización respecto al precio del servicio.

Tabla 20. Tabla de sensibilización del precio de la emulsión

Factor de Sensibilización	Precio Emulsión (US\$/m ³)	Gasto Anual (kUS\$)	Beneficio (kUS\$)
0.5	1058	474	903
0.6	1270	569	808
0.7	1481	664	714
0.8	1693	758	619
0.9	1904	853	524
1	2116	948	429
1.1	2328	1043	334
1.2	2539	1138	240
1.3	2751	1232	145
1.4	2963	1327	50
1.5	3174	1422	-45
1.6	3386	1517	-140
1.7	3597	1612	-234
1.8	3809	1706	-329
1.9	4021	1801	-424
2	4232	1896	-519

Tal como se muestra en la tabla 20, si el precio por el metro cúbico actual de emulsión (en azul) aumenta un 50%, esto es US\$ 3.174 (en rojo), se tiene beneficio negativo respecto al año 2014. El precio en el cual el beneficio se hace cero es 3,1 US\$/L.

Por otra parte, asumiendo que durante el año el servicio de aplicación de la emulsión mantiene constante su precio (2.116 US\$/m³), se puede generar una tabla de sensibilización respecto al volumen de emulsión aplicada al camino.

Tabla 21. Tabla de sensibilización del volumen de la emulsión

Factor de Sensibilización	Volumen Emulsión (m3)	Gasto Anual (kUS\$)	Beneficio (kUS\$)
0.5	224	474	903
0.6	269	569	809
0.7	314	664	714
0.8	358	758	619
0.9	403	853	524
1	448	948	429
1.1	493	1043	335
1.2	538	1138	240
1.3	582	1232	145
1.4	627	1327	50
1.5	672	1422	-45
1.6	717	1517	-139
1.7	762	1612	-234
1.8	806	1706	-329
1.9	851	1801	-424
2	896	1896	-519

Tal como se muestra en la tabla 21, si el volumen actual de emulsión (en azul) aumenta un 50%, esto es 672 m³ (en rojo), se tiene beneficio negativo respecto al año 2014. El volumen al cual el beneficio se hace cero es 651 m³.

4 CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que se logró una disminución de consumo de agua en un 69%, y redujo el gasto en maquinaria asociada a la reconstrucción de la carpeta de rodado en un 45%, respecto al caso base (año 2014). Esto a través de la incorporación y aplicación de un supresor de polvo de tipo bituminoso (emulsión) a lo largo de los 30 km del camino industrial de Los Bronces.

En base a análisis comparativo de supresores de polvo existentes en el mercado nacional (benchmark), y evaluando el nivel de eficiencia, impacto ambiental y efectos en la operación, se logró seleccionar e implementar la mejor solución de supresión de polvo para el caso de Los Bronces, que resultó ser el supresor de polvo de tipo bituminoso (emulsión asfáltica).

A partir del trabajo presentado, se puede concluir que uno de los factores principales para determinar la utilización algún tipo de supresor de polvo, es la condición climática y particularmente la cantidad de humedad presente en el camino. Es por esto que a mayor probabilidad de precipitaciones y humedad, se recomiendan productos bituminosos a base de emulsión asfáltica, ya que tienen un buen comportamiento ante precipitaciones a bajas temperaturas, siendo adecuados para las siguientes faenas mineras: Pelambres, Andina, Los Bronces y Teniente, entre otras. Es importante destacar que los supresores de tipo bituminoso son más costosos que otros productos menos sofisticados, como por ejemplo bischofita y sal, que entregan excelentes resultados en climas secos, sin humedad ni precipitaciones (Chuquicamata, RT y Sierra Gorda).

A través del uso del supresor tipo bituminoso, se logró disminuir en un 80.3% las emisiones MP2,5 promedio, mientras que para el MP10 se logró una reducción de 81,7%, respecto al caso base (2014). Esto representa los excelentes resultados que permite alcanzar el uso de supresor de polvo, entregando caminos libres de polvo, logrando mejores condiciones laborales para los trabajadores de la faena y las comunidades aledañas, aumentando la seguridad e higiene en la operación y reduciendo además el impacto ambiental.

Por su parte, la evaluación del impacto económico que tuvo la implementación del supresor de polvo tipo bituminoso arrojó un beneficio neto de KUS\$ 429 al año, lo que representa una disminución del 17% del gasto en reconstrucción de la carpeta y control de la polución, respecto a la línea base (año 2014). Es interesante revisar que el costo más relevante y por el cual se hace económicamente beneficioso el uso de supresor de polvo, es el ahorro en reparación del camino, esto debido a que al consolidar la carpeta con la emulsión no se requiere riego permanente, lo que permite utilizar los camiones aljibes y motoniveladoras de manera más eficiente durante las obras de reconstrucción, impactando positivamente los costos asociados.

El ahorro de cerca de un 70% del consumo de agua, genera un beneficio que está fuera del alcance de este trabajo, y que considera la utilización de 34.886 m³ para el procesamiento de minerales en la planta, un costo de oportunidad que fue aprovechado por esta iniciativa y que sin duda generó beneficio, considerando además la crítica situación de sequía que sufrió la zona central del país el 2015.

Considerando lo mencionado anteriormente, y en resumen es importante revisar 3 factores fundamentales al momento de utilizar supresores de polvo:

- Condiciones Climáticas del sector a aplicar. Mientras menor humedad y cantidad de precipitaciones tenga el lugar, se tendrán más alternativas de productos a bajo costo.
- Costo Marginal del Agua. Mientras mayor sea el costo marginal del agua, el beneficio de usar supresores de polvo será mayor.
- Desgaste del Camino. Mientras mayor sea el desgaste que sufre un camino, la alternativa de generar un ahorro a través de la disminución de las mantenciones, va a favorecer la utilización de supresores de polvo.

4.1 RECOMENDACIONES

En base a todo el trabajo realizado y bajo una mirada global del impacto que genera el uso de supresores, se recomienda realizar estudios de impacto económico en aquellos factores que no están incluidos en el alcance de este estudio, tales como:

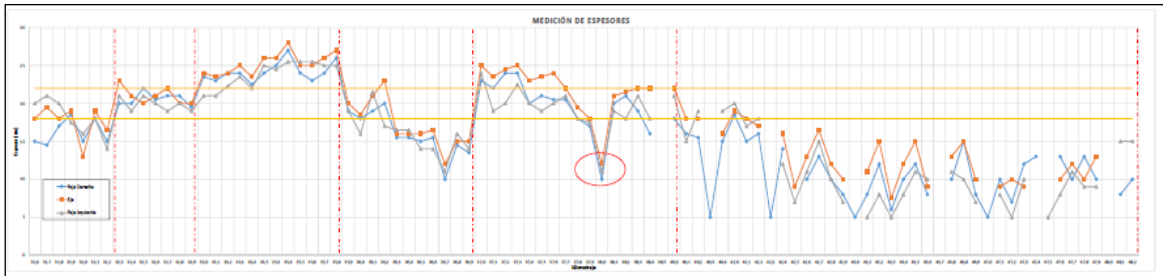
- Beneficio marginal por mayor disponibilidad de agua para el procesamiento de minerales.
- Posible aumento de la vida útil de neumáticos, asociado al camino en mejores condiciones.
- Potencial menor consumo de combustible, debido a la menor resistencia de rodado.
- Disponibilidad del camino y equipos asociados a mantención.
- Posible aumento de la vida útil de insumos y equipos de mantención.

5 BIBLIOGRAFÍA

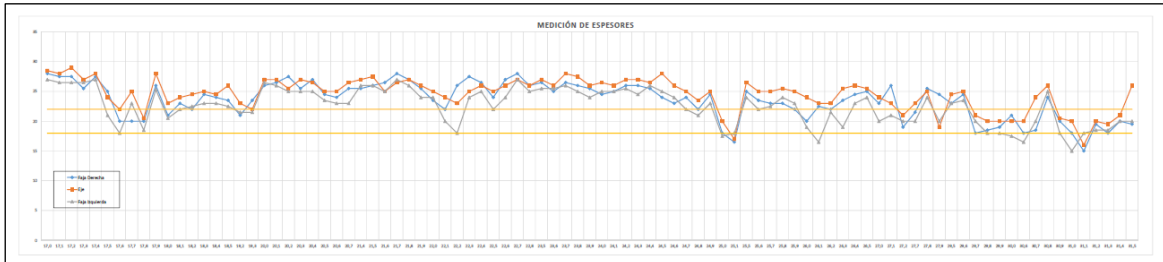
- Experiencias en la aplicación de Bischofita para la conservación de caminos enripiados en la provincia de San Juan. Bustos, Marcelo. Escuela de ingeniería de caminos de montaña, Universidad Nacional de San Juan. Argentina, 2008.
- Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos Soiltac. Araya Díaz, María Loreto. Universidad Austral de Chile. Valdivia - Chile, 2010.
- Prácticas para suprimir el polvo. Rada, Ramón y Cruz, Ricardo. Revista Minería Chilena. Santiago – Chile, julio de 2013.
- Estudio teórico - experimental de demanda, tecnología y economía de métodos para la supresión de polvo en caminos de la región de Los Ríos. García Ruíz, Andrés Marcelo. Universidad Austral de Chile. Valdivia - Chile, 2012.
- Análisis comparativo para ejecución de estabilización de suelos, entre procesos tradicionales y el estabilizador de suelos Soiltac. Araya Díaz, María Loreto. Universidad Austral de Chile. Valdivia - Chile, 2010.
- Cátedra de control de polvo. Dr. Vega Farfán, José Luis. Universidad Nacional de Piura. Piura – Perú, 2013.
- Análisis comparativo de la eficiencia de supresores de polvo mediante el uso del equipo DustMate y el efecto económico para la conservación rutinaria y periódica de carpetas granulares. Campos Dinamarca, Gabriel. Región del Maule - Chile, 2010.
- Decreto Supremo N°185. Ministerio de Minería. Santiago - Chile, 1992.
- Decreto Supremo N°45. Ministerio de Minería. Santiago - Chile, 1986.

6 ANEXOS

A. Medición de Espesores de Base del Camino Industrial Los Bronces



1. Medición de Espesores Base del Camino Industrial, 2014



2. Medición de Espesores Base del Camino Industrial, 2015

B. Empresas Proveedoras de Servicios de Supresión de Polvo

Empresa Proveedoras	DUST CONTROL		LANZ Y CIA		RMS CHILE	SALMAG				
Producto	Petrosoil/Bivesoil		Suppol		ISS2500	Bischofita Servicio DustMag				
Fabricante	Dust Control		Asfalto y Emuls		RMS					
Parámetros Técnicos										
Tiempo de curado	inmediato		30 min		inmediato	inmediato				
Tipo aplicación	Mezcla acuosa de bitumen asfáltico		iónico aglomerante		Estabilizador iónico de suelos	Cloruro de magnesio				
Experiencia										
Experiencia en faenas	Los Pelambres (camino industrial), Carmen de Andacollo, Caserones, Andina, Tres Valles		Los Pelambres, RT, El Tesoro		Caserones (estabilización carpetas área mina), Pascua Lama (estabilización aeródromo)	Cerro Colorado, Lomas Bayas (servicio control polvo caminos mineros), Chuquicamata, RT, Spence				
Contratos										
Contratos	Carmen de Andacollo	Los Pelambres	El Tesoro	Los Pelambres	Caserones	Cerro Colorado BHP	Mantos Blancos Anglo-American	Lomas Bayas Gelncore		
Fecha de Terminación de Contrato	ago-14	mar-15	may-16	feb-13	may-13	dic-14	propuesta	abr-16		
Tipo de contrato	Servicio de aplicación y suministro de Petrosoil en Caminos de Servicio incluyendo Monitoreo MPS		Contrato de Mantenimiento integral de caminos de servicio de control de polvo incluyendo monitoreo de MPS		Servicio Integral para el Control de Polvo	Prueba de Resultado de Supresión de Polvo	Estabilización de Carpetas en área mina	servicio de control de polvo y gestión de caminos mineros	Aplicación de tratamiento supresor de polvo con Bischofita.	servicio de control de polvo y gestión de caminos mineros

1. Empresas Proveedoras de Servicios de Supresión de Polvo, Parte 1

Empresa Proveedora	STARMINE (3M)		VIAL CORP				DUST A SIDE			
Producto	SDS-4 (polímero)		Elaboración propia supresores HV0, HIC				Emulsión caminos			
Fabricante	3M		VIAL CORP				QLSA/Dust A Side			
Parámetros Técnicos										
Tiempo de curado	inmediato		15 min				inmediato			
Tipo aplicación	Polímero Aglomerante		Emulsión asfáltica				Supresor Bituminoso			
Experiencia										
Experiencia en faenas	MEL, BHP		Esperanza, Collahuasi, Cerro Colorado				Los Pelambres, Tte, Andina, Aas (prueba)			
Contratos										
Contratos	Escondida BHP	Proyectos BHP	Minera Esperanza AAMSA	Los Colorados CAP	Cerro Colorado BHP	Lomas Bayas	Los Pelambres SA	Teniente CODELCO	Andina CODELCO	Los Bronces AA
Fecha de Terminación de Contrato	jul-14	oct-14	oct-16	abr-14	ene-15	Presente	dic-14	jul-14	feb-14	abr-14
Tipo de contrato	Prueba de control de polvo en caminos	Prueba de control de polvo en caminos	Mantenimiento/construcción de caminos de servicio	Servicio de control de polvo en caminos mineros y de servicios.	Servicio de control de polvo de caminos mineros y de servicio	Mantenimiento de caminos mineros	Servicio Supresión de Polvo Caminos Área Mina CS-817	Servicio de Asfaltado ADIT 42 Contrato 4501363127	Prueba Mitigadores de Polvo Mina Rajo Contrato 4400049109	Prueba Supresor de Polvo en Caminos Inetrior Mina Contrato 1.14.0027.1

2. Empresas Proveedoras de Servicios de Supresión de Polvo, Parte 2

Empresa Proveedor	AGUASIN		K+S CHILE	NALCO	RST HELLEMA		SOBITEC		AGUA MARINA
Producto	Soiltac/Durasoil		Sal/Salmuera	Haul-EZ 81201/Dust Foam Plus	Avenger/RT60 /RT9		DustBloc		Bioseal
Fabricante	Soilworks		K+S	Nalco	Reynolds Soil Technologies		Local		Aguamarina
Parámetros Técnicos									
Tiempo de curado	2880		inmediato	NO	2880		NO		2880
Tipo aplicación	Soiltac: Polímero, estabilizado, tóxico Durasoil: Líquido sintético, tóxico		Salmuera a través de equipo disolvedor	Surfactante	Polímero, agente humectante		Base bitumen, base asfalto soluble en agua		bacterias con capacidad biocementadora
Experiencia									
Experiencia en faenas	Angloamericana Tórtolas, CMPC, Yamana Gold		Quebrada Blanca, Teniente	Toquepala, Los Pelmbres (suministro reactivo espumante)	Sierra Gorda SCM (caminos mineros), Minera El Tesoro, Minera Quebrada Blanca, Escondida		Andacollo		Lomas Bayas, aplicación bioseal 14000 mt2 ladera truck shop
Contratos									
Contratos	Teniente CODELCO	Chuquicamata CODELCO	Teniente CODELCO		Sierra Gorda SCM	Sierra Gorda SCM	Carmen de Andacollo	Quebrada Blanca	
Fecha de Terminación de Contrato	feb-12	ene-14	abr-16		abr-14	abr-15			
Tipo de contrato	Tranque Cauquenes	Salar el Indio	CONTRATO MULTIDIVISIONAL PARA EL SUMINISTRO DE SALES, ESTABILIZADORES DE SUELO		CSO-133 CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO EN CAMINOS MINEROS	SG.13.CS.052 .1, SERVICIO SUPRESOR DE POLVO	Supresión de Polvo	Supresión de Polvo	

3. Empresas Proveedoras de Servicios de Supresión de Polvo, Parte 3

C. Cantidad de Riegos Anuales y Mediciones de Material Particulado 2015.

Tramo	Cantidad de Riegos											
	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total Anual
Puente La Isla - La palomera	9	12	7	8	10	7	7	4	7	11	2	84
La Palomera- Paso Marchant	7	17	10	7	0	10	4	5	10	10	1	81
Paso Marchant - Sector Hotel	0	7	6	7	0	3	1	3	6	3	4	40
Quebrada duarte	0	0	6	6	10	1	0	1	6	1	0	31
Kilometro 32 - Los piches	0	0	5	6	0	0	0	0	0	4	1	16
Los piches - Pérez Caldera	0	0	5	6	0	0	0	0	4	5	4	24
Pérez Caldera - Puente confluencia	0	0	0	0	5	0	0	0	0	3	1	9
Puente confluencia - Riecillo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	5
Riecillo - 42,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	6
42,5 - Túnel Dolores	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	2	7
Portal los bronces - Edificio Placa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1 Cantidad de Riegos mensuales durante el 2015

Tramo	Mediciones Dumat PM 10										
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Puente La Isla - La Palomera	111.78		240.18		149.07			82.41	74.05		
La Palomera- Paso Marchant	101.02	141.37		157.83	225.77	56.73		66.92	169.26	66.92	
Paso Marchant - Sector Hotel			203.07	165.35		129.85	339.62	411.87	1 561.52	339.62	
Quebrada duarte							369.59		2 315.60		
Kilometro 32 - Los piches				338			244.52			369.59	
Los piches - Pérez Caldera									1 555.56	244.52	
Pérez Caldera - Puente confluencia				168.72			107.60		298.60		
Puente confluencia - Riecillo						56.73			1 660.14	107.60	
Riecillo - 42,5							42.58		284.35		
42,5 - Túnel Dolores									2 510.13	264.35	
Portal los bronces - Edificio Placa									4 060.47	2 230.13	

2. Mediciones DustMate por tramos del camino industrial

Tramo	Mediciones Dumat PM 2,5										
	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Puente La Isla - La Palomera	9.63		19.62		16.04			11.18	8.68		
La Palomera- Paso Marchant	13.18	9.22		13.35	29.88	12.41		8.54	27.46	1 461.34	
Paso Marchant - Sector Hotel			15.82	11.28		16.54	36.10	46.67	1 561.52		
Quebrada duarte							31.15		2 315.60	8.54	
Kilometro 32 - Los piches				32.61			32.61			46.67	
Los piches - Pérez Caldera									1 555.56		
Pérez Caldera - Puente confluencia				13.66			13.07		298.60	274.32	
Puente confluencia - Riecillo						12.41			1 660.14	848.27	
Riecillo - 42,5							5.65		284.35	3 060.43	
42,5 - Túnel Dolores									838.24		
Portal los bronces - Edificio Placa									4 060.47		

3. Mediciones DustMate por tramos del camino industrial