

Medidas de Mitigación para Material Particulado: usos en Chile y evaluación de alternativas para su aplicación en caminos forestales de la Comuna de Santa Juana.

K. Vergara Silva¹, C. Sobenes Vannekoool², G. Bustamante Laissle³

Resumen:

La emisión de material particulado, o polvo, es un problema que se produce en caminos no pavimentados, los que se mitigan con agua y que por lo tanto depende de la disponibilidad hídrica. Su control se realiza mediante procesos húmedos como el riego durante los procesos de movimiento de tierras (demolición y excavación), y el humedecimiento de áreas de trabajo en los procesos de estructura y acabados. Considerando que el agua se está priorizando para consumo humano, es que en las actividades industriales que generan polvo en suspensión proveniente de caminos de tierra, se deben utilizar supresores de polvo, usando la mínima o nula cantidad de agua. En la comuna de Santa Juana diversos caminos forestales y rutas rurales no son asfaltadas o pavimentadas, las que requerirán responder a su manejo, para lo cual es necesario conocer la extensión, evaluar alternativas de supresores presentes en el mercado nacional y, además, requiere una evaluación económica, para presentar a aquellas empresas que deben hacer uso de éstos.

Palabras Claves: Material Particulado, Supresores de polvo, Caminos, Forestales.

Abstract:

The emission of particulate material, or dust, is a problem that occurs on unpaved roads, which are mitigated with water and therefore depend on water availability. Its control is carried out through wet processes such as irrigation during earth moving processes (demolition and excavation), and the wetting of work areas in the structure and finishing processes. Considering that water is being prioritized for human consumption, it is that in industrial activities that generate suspended dust from dirt roads, dust suppressants must be used, using the minimum or no amount of water. In the commune of Santa Juana, several forest roads and rural routes are not asphalted or paved, which will require responding to their management, for which it is necessary to know the extension, and suppressor alternatives, which requires a technical and economic evaluation, to introduce those companies that should make use of them.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, kvergara@ing.ucsc.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, csobenes@ucsc.cl

³ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile, gbustamante@ucsc.cl

Introducción

En Chile hay 85.983,88 Km. de rutas públicas, tanto locales, regionales e internacionales, de las cuales sólo un 24,7% están pavimentadas con carpetas de asfalto u hormigón (MOP, 2021), siendo los demás caminos de ripio y tierra. El tráfico vehicular por estas carreteras no pavimentadas, se inicia con la pulverización de material superficial del suelo por efecto de las ruedas de los vehículos, al levantar y exponer el polvo a corrientes fuertes de aire detrás de las ruedas (Flores et al, 2011). La USDA Forst Service (1983) señala que por cada vehículo que viaja una milla de la carretera sin pavimentar, una vez al día, todos los días durante un año, una tonelada de polvo se deposita a lo largo de un corredor de 1.000 pies centrados en el camino. Estas emisiones de polvo, provocan efectos adversos sobre los servicios ecosistémicos, en los ecosistemas agrícolas costeros, agua dulce y ecosistemas terrestres (World Resources Institute, 2000; Grantz et al., 2003). De manera muy relevante, puede afectar a la salud de las personas, observándose que por cada aumento de $10 \mu\text{g m}^{-3}$ de material particulado de 10μ (MP10) aumenta la frecuencia de muertes por todas las causas en 1% y las cardiovasculares y respiratorias en 0,4% en Europa y 7% en Estados Unidos (Schwartz, 1994; Samet et al., 2000).

La emisión de polvo se puede controlar mediante aceites vegetales, sales y cloruros, polímeros sintéticos, productos orgánicos no bituminosos, productos bituminosos, productos electroquímicos y agua, mediante procesos húmedos tales como el control de riego en los procesos de movimiento de tierras (demolición y excavación), y el humedecimiento de áreas de trabajo en los procesos de estructura y acabados (amolado, copado, pulido de superficies, etc.) (Malkoc et al., 2010; Brauer et al., 2019).

En Chile la Ley 19.300 define al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) como un instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo que permite a la autoridad determinar antes de la ejecución de un proyecto si este cumple con la legislación ambiental vigente y si, se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos (Ley 19.300, 2022). Los proyectos deben someterse a un proceso de evaluación de impacto ambiental, según lo que establecido en el art. 10 de la Ley N°19.300, ya sea través de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Los proyectos que deben presentar DIA son aquellos que no presenta algún efecto, característica o circunstancias de art.11 de la ley N°19.300, es decir sobre los objetos de protección: Salud de la población; Recursos naturales renovables; Sistema de vida y costumbres de grupos humanos; poblaciones, recursos y áreas protegidas; Áreas con valor paisajístico; Áreas con valor turístico y

Patrimonio cultural. De lo contrario, deben presentar un EIA. Someter un proyecto al SEIA permite acreditar el cumplimiento de la normativa y obtener las autorizaciones ambientales respectivas.

Diferentes sectores industriales de Chile, y según sus actividades, emitirán material particulado, el que en caso de generar un impacto ambiental, al aumentar las concentraciones ambientales de MP, deberán considerar en las áreas de influencia, los impactos estimados y predecir éstos (SEA, 2015). Acorde a lo señalado por MMA (2022), las medidas de mitigación pueden ser preventivas, de reparación o compensación. La primera, se considera cuando es posible evitar o disminuir el efecto que puede generar la intervención, es decir, esta medida de mitigación busca en este caso evitar la aparición de un impacto en el desarrollo de un proyecto, por lo que se trata de adoptar una medida a priori para cualquier acción. La segunda, busca corregir o minimizar el efecto ocasionado, es decir, que, al generar una intervención, y como consecuencia esta provoca un efecto negativo, se considera una medida que pueda restaurar en lo posible el efecto u reducir repercusiones. Y, por último, la medida de compensación, se implementa en los casos que el proyecto va a generar efectos en el medio ambiente irreversibles, notorios y, que causan alteraciones perjudiciales en el corto y largo plazo, por ello, que estas medidas buscan corregir de alguna manera la acción y, además de implementar medidas que compense la magnitud del daño (MMA, 2022). Las medidas se pueden implementar durante la ejecución del proyecto o una vez esté finalizado.

En Chile el D. L. N° 701 de Fomento forestal de 1974, promovieron la masificación de las plantaciones y, en forma simultánea, a un proceso cambio de uso de tierra desde agrícola a forestal en la Comuna de Santa Juana de la Región del Biobío (Ríos, 2018). La superficie acumulada de plantaciones forestales en Chile a diciembre de 2018 reporta un total de 2.303.886 hectáreas (INFOR), siendo el pino radiata (*Pinus insignis*) el que cubre la mayor parte de esta superficie (55,8%), seguida por el eucalipto (*Eucalyptus globulus*) (37,2%) y la Región del Biobío aporta con 39,2% de la superficie nacional (Cardemil, 2021).

Debido a que el uso del agua se está priorizando para consumo humano, actividades de subsistencia, protección de sus fuentes, y la condición de sequía en la que se encuentra el país, el presente estudio tiene como objetivo revisar las medidas utilizadas en diferentes sectores industriales del país y proponer medidas de mitigación para el material particulado generado en caminos forestales de la comuna de Santa Juana, Región del Biobío, Chile. Para lo anterior, se propusieron como objetivos específicos:

- Describir las medidas de mitigación propuestas en proyectos de sectores industriales ingresados al Servicio de Evaluación Ambiental de Chile.
- Evaluar alternativas de mitigación de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana.
- Evaluar económicamente las alternativas de mitigación de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana.

Metodología

Medidas de Mitigación

Se revisarán los proyectos de inversión que han ingresado al Servicio de Evaluación Ambiental (SEIA) de Chile, para sistematizar la información mediante una tabla que resuma los antecedentes de cada una de las industrias presentes, donde se especifique el proceso productivo y las medidas de mitigación que se consideran.

Evaluación Alternativas de supresores de Polvo

Para la evaluación técnica de las alternativas de mitigación de polvo para caminos forestales en la comuna de Santa Juana, se considerarán los antecedentes sobre las características de los supresores de polvo, sobre la situación hídrica a nivel nacional como comunal y, por último, antecedentes de la industria forestal, que se describen a continuación.

Supresores de Polvo

La revista minería chilena en su publicación del 04 de junio del 2013 define los supresores de polvo como productos que reducen la emisión de las 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.

Los Supresores de Polvo utilizados son derivados de la lignina, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, cloruro de sodio, el tejido de carreteras, adhesivos resinosos, agua. La selección de un determinado inhibidor depende no sólo de sus características actuales, sino también del tipo y volumen del tráfico, la condición de la carretera y el costo del producto para lograr el nivel deseado de control de polvo (Colorado Centro de Información de Transporte, 1989).

Existen dos métodos principales para la aplicación de los Supresores del Polvo:



Rociados por vía tópica: Consiste en rociar la superficie del camino, una vez que éste ha sido tratado, es decir, se le aplicó moto niveladora y rodillo, quedando un camino con mejor compactación y pendientes de escurrimiento bien marcadas. Este método es simple y rápido (Colorado Centro de Información de Transporte, 1989).

Mezclados in-situ: Este método implica adicionar el supresor al material que será agregado a la carretera, una vez que ésta ha sido escarificada. Este método no solo logra suprimir las partículas de polvo, sino también, ofrece una mejor carpeta de rodado, mejorando el terreno para una sub-base y base de una futura pavimentación con un material superior (Colorado Centro de Información de Transporte, 1989).

A continuación, la tabla 1, describe los tipos de supresores de polvo utilizados en Chile y sus características.

Tabla 1: Eficiencia de supresores de polvo.

Tipos de Supresores	Eficiencia en control de polvo	Características operacionales
Agua	Eficiencia de aprox. 40% en la captación de polvo en suspensión, pero su control de polvo decrece desde 100% a 0% en muy corto tiempo especialmente si el clima es caluroso y seco.	Depende de la humedad ambiente. No evita la elevación de partículas más finas, ya que no encapsula el camino. Además, facilita la formación de barro lo que puede generar erosión acelerada en el camino.
Cloruro de calcio	Tiene una eficiencia de 55%. Debido que es altamente higroscópico absorbe la humedad y la mantiene, su temperatura de evaporación es alta, favoreciendo la compactación del terreno bajando costos de mantención por erosión.	El cloruro de calcio no requiere preparación y su método de aplicación es directo mediante camiones aljibes con regadío.
Cloruro de magnesio	El cloruro de magnesio tiene una eficiencia del 87% en control de polución, sin embargo, puede filtrarse el cloruro arrastrado por el agua a través del suelo, si es que no tiene un mantenimiento adecuado.	Conocido como Bischofita, se considera dentro mercado nacional como un supresor muy efectivo, ya que es de tipo higroscópica. No es complementario con riego regular de agua para controlar polvo.
No bituminoso (lignosulfonato)	Eficiencia del 63%. Actúa como cementante ligando las partículas de suelo entre si tiende a mantener la plasticidad permitiendo la compactación del suelo	Con baja humedad y alta temperatura es más efectivo que cloruros, pero a corto a plazo. Existen dos posibilidades de aplicación, una que requiere mantención y la otra requiere un periodo más prolongado de aplicación.

Tipos de Supresores	Eficiencia en control de polvo	Características operacionales
No bituminosos (aceites vegetales y melazas)	Efectividad del 84%. Actúan originando la aglomeración de las partículas de suelo, creando una suave costra sobre la superficie, pero su eficiencia es de corto plazo.	Mayoritariamente se remueven con el agua y no impermeabilizan el camino, además es de poca durabilidad en el tiempo.
Orgánicos bituminosos emulsión asfáltica	Posee una efectividad de 95% y tiene una gran capacidad de impermeabilizante	Considerado supresor de larga duración, mancha vehículos durante su aplicación, alta resistencia al rodado y tensión de carga, reduce ciclo de riego y permite reparación de camino sobre riego.

Fuente: Modificado de Astudillo (2019).

Escasez hídrica

A nivel país y mundial el déficit de agua es una problemática que afecta tanto el desarrollo humano, como el ecosistema. Chile actualmente Según la publicación de la Fundación Chile "Radiografía del Agua: brecha y riesgo hídrico en Chile", el 76% de la superficie chilena está afectada por sequía, desertificación y suelo degradado.

La disminución de las precipitaciones, está directamente relacionada a una disminución de caudal en los ríos, una reducción en la recarga de los acuíferos y, por ende, una disminución global en el agua disponible para diferentes usos. Si bien todos los sectores productivos y la población pueden verse afectados por este evento de escasez hídrica, en la región del Bio Bio son especialmente vulnerables, el abastecimiento de agua potable y para riego, la disponibilidad de agua para las plantaciones forestales y el uso del agua con fines industriales (EULA, 2016).

Santa Juana es una comuna de la Provincia de Concepción ubicada en el Valle de Catiray, al sur de la ribera del Río Bío Bío. La población, con gran identidad campesina, ha sido poco a poco abandonando los campos debido a diversas razones. La más compleja: la sequía provocada por el excesivo monocultivo forestal y el cambio climático (Soto, 2022).

Plantaciones en las quebradas, en los inicios de vertientes y monocultivos intensivos por décadas han dejado un desastroso panorama en los campos de Santa Juana. Todo ello también fomentado por el DL701, decreto que fomento con dineros públicos las plantaciones forestales (Soto, 2022).

En la comuna más de mil familias viven con apenas 50 litros de agua diaria suministrada por camiones aljibe, lo que contraviene al mínimo de 100 litros establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además, existen 18 APR en la comuna de los cuales 2 son tutelados por la DOH y 16 son sistemas deficientes en infraestructura y gestión. Estos últimos no cuentan en su mayoría con cloración, derechos de agua y, existen sistemas abastecidos por vertientes que en meses de altas temperaturas se secan.

Industria forestal en Chile

En Chile existen más de tres millones de hectáreas de monocultivos de pino y eucalipto que abastecen una industria forestal (INFOR, 2022).

Los impactos ambientales que genera esta industria sobre la disponibilidad de agua, la calidad del suelo, el paisaje y la propagación de incendios han sido ampliamente documentados por la ciencia. Impactos que, además, el cambio climático profundiza, aseguran los expertos. Sin embargo, la actividad forestal industrial en Chile no ingresa al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) por lo que los proyectos no son evaluados y los problemas mencionados no son medidos, mitigados, ni compensados (Carrere, 2021).

Por consiguiente, la información generada a partir del "Catastro de uso de suelo y vegetación", CONAF, año 2008. En relación al uso de suelo, la comuna de Santa Juana presenta una superficie total de 77.922,3 ha, de ellas, el uso bosque con 74,8% (10.281,1 ha), y finalmente el 2,6% (759,2 ha) de uso cuerpos de agua.

Evaluación Económica

Para realizar la evaluación económica de las alternativas de supresores de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana, se realizará un comparativo a través de una evaluación económica de dos supresores de polvo que son más reconocidos en el mercado considerando valor UF del día 18/10/2022 (\$34.470,59). Se considera únicamente en el costo de aplicación y costo de mantención correspondiente a la diferencia entre ambos supresores, ya que el proceso constructivo debe ser el mismo.

Para profundizar en la diferencia entre los estabilizadores que se evaluarán, se considera:

- El análisis, se realizará en base a un tramo de 1 Km y un ancho promedio de 6 m (consideraciones en otros análisis)
- El tiempo por el cual se analizarán cada proyecto de Supresión de Polvo, será de corto (1 año), mediano (3 años) y largo plazo (5 años).

Los supresores a evaluar son:

- a) Cloruro de Sodio.

Para el caso del NaCl, se consideran los datos de Hinrichsen (2005), la cual establece que en general las bases son las mismas para los tres tipos de carpeta con sal o para un tratamiento simple:

- El material se encuentra en el camino.
- Acordonar el material existente y despedrarlo, sacando el sobre tamaño superior a 2".



- Agregar sal (NaCl) de Sal Lobos en 1,8% en peso seco del material compactado.
- Por consiguiente, se requieren 33 kg de sal por metro lineal de carpeta (Hinrichsen, 2005)

Se supondrá mantenciones todos los meses del año, la cual consiste en compactar la superficie con una motoniveladora una vez al mes por diez meses y una vez al año se le agregará un 30% de la sal con respecto a la sal colocada inicialmente (Hinrichsen, 2005).

b) Bischofita (Cloruro de Magnesio Hexahidratado).

Para la bischofita, el material presente en el camino, será el utilizado para llevar a cabo la aplicación de la solución:

- El material se encuentra en el camino.
- El tratamiento previo al camino, será tener un grado de humedad (el cual se cumple en toda la región), perfilado y compactado, logrando homogeneidad sin material suelto.
- Se determina que la densidad de la solución aplicada en la Región será de 1,25 kg/l, teniendo un rendimiento de 3 litros por metro cuadrado en la zona sur.
- El Rociado de la solución de Agua-Bischofita, se realiza a velocidad constante del vehículo y con una penetración de 1 cm. la carpeta del camino (Viacorp, 2012).

El análisis comparativo de cada uno de los supresores anteriormente descritos, se realizará sobre el cálculo del Valor Actualizado Neto (VAN) según ecuación 1. El cual consiste en determinar la equivalencia en el tiempo 0 de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con la Inversión inicial (Estrada, 2006). El Banco Central de Chile, estableció que para el año 2022 la Tasa de Interés para las inversiones será de un 8,25%, la cual utilizaremos para el cálculo de la VAN Privada (Banco Central de Chile, 2022). Los flujos que serán analizados corresponderán a costos e inversiones, es decir, el menor valor de VAN, el cual indicará en que supresor se incurren en menores Gastos para llevar a cabo el Proyecto.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} \quad (\text{ec.1})$$

Donde:

VAN = Valor actual neto

I₀ = Inversión inicial

F_t = Flujo neto operacional

I = tasa de descuento privada



Además, se considera evaluar el indicador de Tasa interna de retorno (TIR) estimada como aquel valor de la tasa cuando el valor actual neto es igual a cero.

Resultados

Medidas de mitigación material particulado en Chile

Luego de identificar las medidas de mitigación para el material particulado en los distintos sectores industriales, para así disponer de las diferentes alternativas utilizadas en Chile y que pudieran considerarse en su aplicación en el Sector Forestal, una síntesis son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2: Medidas de mitigación de material particulado identificadas en el Servicio de evaluación Ambiental de Chile, en distintos sectores productivos o industriales de Chile.

Sector productivo o industrial	Antecedentes	Medidas de mitigación
Construcción/ Inmobiliaria	Se utiliza mitigación del polvo o control de éste en la fase de construcción y operación, por el constante movimiento de maquinaria sobre el suelo, remoción, acopio de materiales sólidos y, excavaciones sobre el suelo.	<p>En fase de construcción las medidas de mitigación sugeridas son: humectación a zonas de acopio o desplazamiento, utilización de supresores de polvo en lugares donde transite maquinaria como caminos no pavimentados principalmente, instalación de malla Rachell (SEA, 2019).</p> <p>En la fase de operación se estiman las emisiones atmosféricas de MP y gases del proyecto, las que se generan por las actividades de transportes asociadas a los flujos de viajes y por el funcionamiento de los sistemas de calefacción y aire acondicionado del proyecto (SEA, 2019).</p>
Minería	Debido a los procesos que se realizan para la extracción del mineral como explosiones, transporte y acopio de material. Se genera gran cantidad de polvo en suspensión.	<p>Se utilizan supresores de polvo que son sustancias de diferentes propiedades físico químicas que permiten prevenir, suprimir, abatir o mitigar el polvo en suspensión y material particulado presente en áreas de operación minera (Rada, 2019).</p> <p>Hay sistemas de control utilizadas por la minería, estas son dos tipos: el de supresión de polvo y el control de polvo por vía seca de limpieza automática (MCh, 2015).</p>

Sector productivo o industrial	Antecedentes	Medidas de mitigación
Caminos rurales forestales	<p>Se produce material particulado debido a las características de suelo superficial suelto por consecuencia del constante tránsito de vehículos y por condiciones naturales. Se vincula con los sectores productivos o industriales, ya que, son utilizados en su mayoría para el tránsito de camiones que operan en las industrias. Los sectores más relacionados son el sector forestal, por la ubicación de estos previos (en zonas rurales) donde la mayoría de caminos no se encuentran pavimentados. En situaciones naturales, se presentan en lugares especialmente áridos. Las partículas de suelo debido a los vientos suelen salir en suspensión a la atmosfera principalmente las emisiones de polvo en caminos no pavimentados (Cowherd et al., 1974; Kunhns et al., 2005)</p> <p>Polvo en carreteras: Polvo levantado por los vehículos que circulen en las carreteras puede constituir hasta el 33% del polvo en el aire. El polvo del camino representa una fuente importante que contribuye a la generación y liberación de partículas a la atmósfera (Malkoç et. al 2010).</p>	Preferentemente si es que se utiliza alguna medida esta es la humectación con agua.

Sector productivo o industrial	Antecedentes	Medidas de mitigación
Actividad agrícola	<p>La suspensión de polvo afecta la calidad de los productos, por la acumulación de polvo que genera una barrera sobre las hojas de las plantas impidiendo la absorción de luz solar (Flores et al, 2011)</p> <p>Una de las causas del material particulado es el tránsito de camiones, en caminos sobre caminos no pavimentados (Zona Rural). También, es la remoción del suelo, al momento de arar la tierra y prepararla para la posterior siembra o plantado. (Flores et al, 2011)</p> <p>La suciedad acumulada sobre las hojas disminuye la cantidad de luz que recibe el vegetal.</p>	<p>Las prácticas agrícolas relacionadas con el manejo del suelo, como la preparación del terreno, son una fuente importante de dispersión de material particulado al aire (Holmen et al., 1998; Madden et al., 2009)</p> <p>La solución para la suspensión de polvo es utilizar agua para humectar las zonas de trabajo.</p>
Actividad Forestal	<p>La principal fuente de generación de polvo es por el tránsito de camiones sobre los caminos forestales y rurales que son no se encuentran pavimentados. El peso de los camiones permite la fácil remoción del suelo superficial generando a los alrededores de los caminos capas de polvo sobre la vegetación y, provocando que ésta se seque.</p>	<p>En algunas ocasiones considera la humectación del suelo mediante camiones aljibe en zonas donde transitan y que estén pobladas, siempre y cuando éstas se encuentren a orillas del camino y sean directamente perjudicadas.</p> <p>Las empresas dedicadas a las astillas con fines de uso para la leña, consideran la mitigación de polvo mediante la humectación de caminos no pavimentados.</p>

Evaluación de alternativas de supresores de polvo para la mitigación de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana

Dentro de la evaluación de alternativas para la mitigación de polvo en caminos forestales de la comuna de Santa Juana y, con los antecedentes expuestos, la escasez hídrica es el principal factor a considerar para elegir el método de supresión de polvo.

Además, debido a la alta densidad de plantaciones de árboles exóticos en el territorio y el reemplazo de bosque nativo, aportó en que vertientes existentes en las cuencas fueran usadas por las nuevas plantaciones. Es por ello que la primera alternativa y más común de supresor de polvo que es el agua, en estas condiciones de escasez no es una medida de mitigación sustentable y viable, ya que se prioriza su uso para el consumo humano. Además, no es eficiente en temporadas de verano por la alta evaporación y baja durabilidad, provocando en ciertos sectores de alta humedad remoción de suelo por las ruedas de camiones al formarse barro, provocando además erosión del suelo y deteriorando los caminos.

Para evaluar las otras alternativas expuestas en la tabla 1, se comparó características como la durabilidad, presencia en el mercado, daño ambiental y eficiencia.

Se identifica que los cloruros poseen un alto rendimiento, siendo el primero el cloruro de calcio el cual tiene una eficiencia sobre 50% y favorece la compactación del terreno, evita costos de erosión, y así el camino no sufre mayores daños y su entorno. Es una alternativa más reconocida por las otras industrias lo que permite mayor presencia en el mercado, como consecuencia mayor oferta de precios y disponibilidad. Y, por último, un ahorro en su aplicación ya que no necesitan preparar el camino.

En cuanto al cloruro de magnesio tiene una eficiencia de 87%, la mayor de todas las alternativas; el daño que podría provocar su aplicación se puede mitigar mediante una buena mantención; además es una de las más reconocidas en el mercado debido a su efectividad ya que es higroscópica al igual que el cloruro de calcio, evitando el consumo de agua para su mantenimiento.

Por consiguiente, el cloruro de calcio y cloruro de magnesio o bischofita, permitirán otorgar caminos y superficies duraderas en el tiempo, optimizando el recurso hídrico y económico.

Evaluación económica de las alternativas de mitigación de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana

Las alternativas evaluadas son Cloruro de Calcio y Cloruro de Magnesio o Bischofita.

Costos de Construcción carpeta de rodado
Tabla 1: Costo UF de Carpeta de rodado sin Impuesto Valor Agregado (IVA) por m³.

Máquinas	Valor máquina Hora (UF)	Rendimiento (m³/h)	Costo /m³ (UF)
Cargador	1,59	50	0,03
Chancadora	1,58	6	0,26
Motoniveladora	1,62	90	0,02
Aljibe	5,86	90	0,07
Rodillo	0,98	90	0,01
Transporte	0,59	12	0,05
Total (s/iva)			0,44

Se tiene que para 1 km de camino son 900 m³ (1km*6m ancho*espesor de 0,15m) y, el costo del material es cero (material se encuentra en el camino), por lo tanto, el valor total de carpeta de rodado para 1 km es de UF 396.

Cloruro de Sodio

El costo del cloruro de sodio requerido para la elaboración de la carpeta de rodado para un kilómetro, se realizará con 900 m³ de rodado, 32.400 kg de cantidad de estabilizante, con un precio por kilo de sal a 0,003 UF por lo que el valor total del producto será 97,424 UF por un km.

El costo de estabilización del camino con este supresor se considera los descrito por Hinrichsen (2005), donde describe el requerimiento de cuatro jornales y un capataz, considerando el valor día del trabajo de un jornal a 0,522 UF y de un capataz de 0,812 UF incluido leyes sociales.

Por último, el costo de estabilización de un km de camino con cloruro de sodio se calcula considerando el valor de la carpeta de rodado 396 UF; costo de elaboración de carpeta de rodado 97,424 UF; costo de la mano de obra 2,901 UF, por lo tanto, la suma de los tres costos mencionados dividido por 900m³ de camino resulta costo de estabilización por m³ de suelo 0,549 UF. Así, el valor total de 1 km de camino con supresor de polvo NaCl una suma de 493,97 UF

Costo de mantención camino con cloruro de sodio: Este mantenimiento es a contar del año siguiente de haber aplicado la estabilización con Cloruro de Sodio.

Por lo tanto, se considera para obtener el valor de mantenimiento el valor de la maquinaria por 10 meses 84,026 UF; Costo de mano de obra del año siguiente 3,046 UF; 30% de cantidad del estabilizante requerido que es 9.720 kg y, el precio de la sal del año siguiente de la aplicación que sería 0,0031 UF. Lo que da un valor total del producto de 30,146 UF; por lo tanto, la mantención del año 2023, para el tratamiento con cloruro de sodio será 117,218 UF.

Por lo tanto, la aplicación del cloruro de sodio tiene un costo de 493,97 UF y, el costo de mantención al siguiente año de 116,609 UF, ya que, este último solo se aplica una vez al año el 30% de cloruro de sodio que se aplicó la primera vez y, solo se utiliza la motoniveladora.

Cloruro de Magnesio o Bischofita

El costo de Riego con Bischofita en 1 km de camino se calcula considerando superficie de carpeta de rodado de 6.000 m² (1000m*6m de ancho camino) y, valor del tratamiento de riego que incluye aplicación con camión aljibe y personal a cargo de 0,0188 UF/kg; por lo tanto, el valor de carpeta de rodado será 112,792 UF.

Por consiguiente, el costo de construcción de la carpeta y riego con Bischofita se obtiene con la suma del costo de estabilizar con bischofita de 112,792 UF más el costo carpeta de rodado 396 UF, el resultado se divide por 1000 y, así se obtiene el costo de estabilizante por m³ de suelo 0.506 UF/m³, donde este último costo se multiplica por 900m³, resultando el costo de 1km de carpeta y riego Bischofita por un valor total de 455,796 UF.

Costo de mantención camino con Bischofita: Se debe al considerar el reperfilado de la carpeta, por medio de una Motoniveladora previo a la aplicación del producto, además terminado el periodo estival de diciembre - marzo, cada dos meses se debe repetir la operación de reperfilado por los 8 meses siguientes. Cabe señalar que en aquellos caminos rociados con bischofita no es necesario realizar bacheo.

Valor Reperfilado: costo mensual de 2,472 UF/Km, por lo tanto costo anual será de 9,89 UF, mas valor de mano de obra de 1,334 UF. Lo que da un total de 11,224 UF

Se considera que, para este tipo de caminos secundarios, se debe hacer una reposición completa de la carpeta cada 5 años.

Evaluación de los Costos Proyectados y los Costos Actualizados de cada Alternativa. 3.07908E+15

Una vez expuestas la forma de evaluación de cada una de las alternativas de proyecto se determinaron los costos de mantención y de operación cada una de ellas (estabilización con Cloruro de Sodio y Cloruro de Magnesio). Para poder comparar estos dos proyectos que tienen distinta duración, se contempla un período de análisis de 5 años. Dado que, en el caso de la aplicación de la sal, se debe renovar el camino al inicio del cuarto año, con el riego de Cloruro de Magnesio cada cinco años. Por cual se proyectó periodo de análisis de precios de 5 años máximo.

- a) Estabilización con Cloruro de Sodio. En la tabla 4 se describe el costo de estabilización con uso de cloruro de sodio.

Tabla 4: Costo UF de riego superficial con Cloruro de Sodio con precios ajustados a 5 años.

NaCl	2022	2023	2024	2025	2026
Inversión Inicial	493,975	0	0	0	570,800
Costo de Mantención	0	117,218	121,568	125,924	0
Costo Anual	493,975	117,218	121,568	125,924	570,800
Costo Acumulado	493,975	611,193	732,761	858,685	1.429,485

Luego, el costo total de estabilizar con Cloruro de Sodio con los Valores proyectados a 5 años UF 1.429,485.-

- b) Riego Superficial de Bischofita: En la tabla 5 se describe el costo de estabilización con uso de cloruro de magnesio o bischofita.

Tabla 5: Costos UF de riego superficial con Cloruro de Magnesio o Bischofita, con precios ajustados a 5 años.

Bischofita	2022	2023	2024	2025	2026
Inversión Inicial	455,796	116,447	123,758	127,413	544,215
Costo de Mantención	11,224	11,693	12,164	12,640	13,119
Costo Anual	467,021	128,140	132,267	136,397	140,532
Costo Acumulado	467,797	595,161	727,428	863,825	1.004,357

Luego, el costo total de riego superficial con Bischofita con los Valores proyectados a 5 años UF 1.004,357.-

Análisis comparativo Evaluación de Costos Proyectados.

El análisis de los indicadores económicos se presenta en la Tabla 6 por cada tipo de supresor evaluado.

Tabla 6: Indicadores económicos por tipo de supresor de polvo.

Supresor	VAN (UF)	TIR
Estabilizado con Cloruro de Sodio	805,275	14%
Riego Superficial de Bischofita	496,498	53%

Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio sobre uso de supresores de polvo para la comuna de Santa Juana son similares a las obtenidas por Astudillo (2019), siendo la Bischofita el supresor con indicadores económicos más favorables.

Las variantes climáticas y funcionalidad del producto son factores determinantes para la selección de supresores de polvo. En el presente estudio fueron analizados diferentes clases de productos presentes en el mercado nacional, describiendo su composición, naturaleza, viabilidad y durabilidad en el tiempo, tales como las sales y cloruros que poseen características higroscópicas y presentan un trabajo eficiente bajo las condiciones climáticas presentadas en la faena minera, productos bituminosos naturales asfálticos que presentan una estabilidad y compactación del terreno superior a otros productos presentados, pero finalmente con una preparación técnica exhaustiva en su aplicación y preparación en la carpeta de rodado, sin mencionar que requiere equipo especializado y estabilizadores para su correcta adhesión y estabilidad. Por otra parte, los productos orgánicos no bituminosos naturales como los lignosulfonatos o melazas presentan una mitigación de polvos efectivas pero de cortos plazos no superiores a una semana, lo que conlleva a un riego regular aumentando el uso del producto hídrico, si bien poseen agentes biodegradables y amigables con el medio ambiente, presentan un resultado en cuanto a estabilidad muy inferior a los cloruros o productos bituminosos asfálticos. La aplicación del cloruro de magnesio (Bischofita) no solo presenta un beneficio en la reducción de consumo de agua y supresión de polvo, sino que además otorga un área de trabajo limpio y seguro (Astudillo, 2019; Gallardo 2019).

La bischofita en particular muestra una mayor capacidad de absorción y retención de la humedad en comparación a las otras mezclas con NaCl, lo que se debe fundamentalmente a que en teoría y según los resultados obtenidos, su humedad de equilibrio es menor, además de

tener una menor presión de vapor en solución que una muestra con NaCl, lo que se traduce en una mayor retención de humedad. Por otro lado, la deliquesencia es un mecanismo propio de la bischofita que no se presenta en el cloruro de sodio, lo que permite mantener húmedos los finos de la superficie de los suelos (Heitzer, 2017).

Conclusiones

Los proyectos ingresados al servicio de evaluación ambiental de los distintos sectores industriales de Chile, identifican en cada uno de sus procesos la producción de material particulado, es por ello que consideran medidas de mitigación como supresores de polvo, donde se repite constantemente el uso de agua como supresor de polvo a través de camiones aljibe. Pero es la industria minera quien maneja más alternativas de supresores para reducir el consumo de agua.

Las alternativas evaluadas para la mitigación de polvo para caminos forestales de la comuna de Santa Juana se proponen dos, Cloruro de Calcio y el Cloruro de Magnesio más conocido como Bischofita debido a las características que estas presentan.

Por consiguiente, la evaluación económica de las alternativas mencionadas anteriormente, marca que el Cloruro de Magnesio o Bischofita es la alternativa más económica de los dos evaluadas.

Por último, después del análisis de distintos proyectos a nivel nacional, la evaluación de alternativas en el mercado y evaluación económica, principalmente la consideración de la situación local de escasez hídrica que se propone el Cloruro de Magnesio (Bischofita) como el supresor de polvo mejor evaluado para su aplicación en caminos forestales de la comuna de Santa Juana.

Bibliografía

AFP. 2004. "Deadly dust reduces life expectancy by up to two years in Europe: study". Ginebra. Agence France-Press. (Disponible en: <http://www.terradaaily.com/2004/041129185850.09hw5iw6.html>. Consultado el: 12 de diciembre de 2011).

ASTUDILLO M.; GALLARDO F. 2019. "PROPUESTA DE SUPRESIÓN DE POLVO OPTIMIZANDO EL RECURSO HÍDRICO EN PROYECTO RAJO DULCINEA DEL 1-4, COMUNA DE PETORCA". Trabajo de titulación Universidad Federico Santa María, Sede Viña del Mar. 78p.

BANCO CENTRAL DE CHILE 2022. Indicadores diarios. (Disponible en: <https://si3.bcentral.cl/indicadoressiete/secure/Serie.aspx?gcode=UF¶m=RABmAFYAWQB3AGYAaQBuAEkALQAzADUAbgBNAGgAaAAkADUAVwBQAC4AbQBYADAARwBOAGUAYwBjACMAQQBaAHAARgBhAGcAUABTAGUAYwBsAEMAMQA0AE0AawBLAF8AdQBDACQASABzAG0AXwA2AHQAawBvAFcAZwBKAEwAegBzAF8AbgBMAHIAYgBDAC4ARQA3AFUAVwB4AFIAWQBhAEEAOABkAHkAZwAxAEERAA>. Consultado el: 8 agosto de 2022)

Brauer, D.A., A.A. Giubergia, V.Gil-Costa. 2019. Evaluación de productos para el control de polvo ambiental en caminos mineros. Minería y Geología 35, 165-182. (Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v35n2/1993-8012-mg-35-02-165.pdf>. Consultado el: 30 de agosto 2022).

CARDEMIL, M. 2021. "Industria Forestal en Chile" (Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32419/%201/N_68_21_Industria_Forestal_en_Chile.pdf. Consultado el: 05 de diciembre 2022).

CARRERE, M. 2021. "Chile: científicos piden que la industria forestal pase por una evaluación de impacto ambiental | ENTREVISTA 6 de octubre 2021". (Disponible en: <https://es.mongabay.com/2021/10/chile-industria-forestal-evaluacion-de-impacto-ambiental-entrevista/>. Consultado el: 20 de noviembre 2022)

COLORADO TRANSPORTATION INFORMATION CENTER. 1989. "Road Dust Suppressants". Bulletin #3. Dept. of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins Co, March. (Original no consultado, citado por: SANDERS T.; J. ADDO. 1993. Literature review. En su: Effectiveness and Environmental impact of Road dust suppressants. 1ª Ed. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523. Pp: 4-10)

Cowherd, Jr. C., K. Axetall Jr., C. M. Guenther, and G. A. Jutze. 1974. "Desarrollo de factores de emisión para fuentes de polvo fugitivas". Instituto de Investigaciones del Medio Oeste. Kansas City, MO, USA.

CONAF 2018. "Desafío Forestal Chileno" DOCUMENTO GUÍA PARA LA FORMULACIÓN DE LA POLÍTICA FORESTAL CHILENA Desafíos y Visión 2015-2035 Santiago de Chile, noviembre de 2015. (Disponible en: https://www.conaf.cl/wp-content/files_mf/1469629686folletoguia.pdf Consultado el 7 de diciembre).

EL MERCURIO, "Sequía en Chile: Proyectan que precipitaciones seguirán disminuyendo hasta el 2059", publicado 16 de septiembre 2022, pág. 17. (Disponible en: <https://escenarioshidricos.cl/eh-2030-en-la-prensa/sequia-en-chile-precipitaciones-seguiran-disminuyendo-hasta-2059/>. Consultado el: 16 de diciembre).

ESTRADA, J. 2006. "Finanzas en pocas palabras". 1ra Edición. Madrid, España. Editorial Pretencie-Hall. Pp 421.

EULA 2016. SEMINARIO "Escasez hídrica en la región del Biobío, análisis de tendencias climáticas y desafíos de adaptación/mitigación" (Disponible en: https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2016/08/Programa_Seminario_escasez_hidrica_v3.pdf. Consultado el: 5 de diciembre 2022).

Flores, J.P., M. sukla, J. Wang, y B. Hernández. 2011. Material particulado dispersado al aire por vehículos en caminos agrícolas no pavimentados. Terra Latinoam 29, 23-34. (Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n1/2395-8030-tl-29-01-00023.pdf>. Consultado: 3 de agosto 2022).

INFOR, 2022. (Disponible en: <https://www.infor.cl/>. Consultado el: 17 de diciembre 2022).

HINRICHSEN N.; 2005. "Estudio de Comportamiento de Suelo Estabilizado con Sal: Frente a la Acción del Agua, para Distintas Mezclas". Tesis Universidad Austral de Chile, Fac. Cien. Ing.115p.

Holmén, B. A., W. E. Eichinger, and R. G. Flocchini 1998. "Application of elastic lidar to PM₁₀ emissions from agricultural nonpoint sources". Environ. Sci. Technol. 32: 3068-3076.

Kunhns H, 2005. "Spatial Variability of Unpaved Road Dust PM 10 Emission Factors near El Paso". [Desert Research Institute](#). Texas.

Ley 19.300: Aprueba Ley sobre bases generales del medio Ambiente, ultima version 13 de junio 2022. (Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667&idVersion=2022-06-13&idParte=9705635>. Consultado el: 1 de diciembre 2022).

Madden, N. M., R. J. Southard, and J. P. Mitchell 2009. "Soil water content and soil disaggregation by disking affects Pm₁₀ emissions". J. Environ. Qual. 38: 36-43.

MALKOÇ S.; B. YAZICI; M. ALTAN; A. KOPARAL. 2010 "Street dust pollution of some metals along Eskisehir urban roads, Turkey". ICENV. Abril. Malezya-Pp:13-15.

MMA (Ministerio del Medio Ambiente) 2022. "Adaptación y mitigación". Chile. (Disponible en: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/adaptacion-y-mitigacion/>. Consultado: 04 de abril de 2022).

MCh (Minería Chilena), 2015. "[Control de polvo en el transporte de mineral](#)". (Disponible en: <https://www.mch.cl/reportajes/control-de-polvo-en-el-transporte-de-mineral/#>. Consultado: 14 de diciembre 2021).

[MOP, 2021. Infraestructura de transporte de Carga. Red vial nacional pavimentada y no pavimentada. Dirección de Vialidad. \(Disponible en: https://datos.observatoriologistico.cl/dataviews/226821/red-vial-nacional-pavimentada-y-no-pavimentada/, Consultado: 20 octubre 2022.\)](#)

USDA FOREST SERVICE. 1983. What the Forest Service Does. Slightly rev. May 1983. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Washington, D.C. 16p.

SEA (Servicio de Evaluación Ambiental) 2019. GUÍA PARA LA DESCRIPCIÓN DE PROYECTOS INMOBILIARIOS EN EL SEIA, ARTÍCULO

11 DE LA LEY N° 19.300. Consultado: página 50, fase de construcción.
Página 67 fase de operación.

SEA (Servicio de Evaluación Ambiental) 2022. (Disponible en:
<https://sea.gob.cl>. Consultado: 29 de junio 2022).

Soto, F. 2022. "Santa Juana conmemora el día mundial del agua en el marco de una brutal crisis hídrica" publicado el 22 de marzo 2022. (Disponible en: <https://resumen.cl/articulos/santa-juana-conmemora-el-dia-mundial-del-agua-en-el-marco-de-una-brutal-crisis-hidrica>. Consultado el: 5 de diciembre 2022).

Rada R., 2019. "Control de Material Particulado. Un desafío constante para la minería", Instituto de ingenieros de minas de Chile, publicado 22 de julio 2019. (Disponible en: <https://www.iimch.cl/index.php/noticias2/jueves-minero/2204-jueves-minero-control-de-material-particulado-un-desafio-constante-para-la-mineria>. Consultado: 25 de noviembre 2021)

Ríos, A. 2018. "Radiografía de Chile desde Santa Juana" publicado el 9 de enero 2018. (Disponible en: <https://resumen.cl/articulos/radiografia-chile-desde-santa-juana>. Consultado el: 18 de diciembre 2022).

Samet JM, Dominici F, Curriero FC, Coursac I, Zeger SL. 2000. Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities 1987-1994. *New Engl J Med*; 343: 1742-9.

Schwartz J. 1994. Air pollution and daily mortality: a review and meta-analysis. *Environ Res*; 64: 36-52.

SEA, 2015. Guía para la descripción de la calidad de aire en el área de influencia de proyectos que ingresan al SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente, Chile. 26 p. (Disponible en: https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2016/01/20/guia_calidad_del_aire.pdf. Consultado: 20 octubre de 2022).

World Resources Institute, 2000. World Resources Institute World resources 2000–2001: people and ecosystems: the fraying web of life World Resources Institute, Washington (DC) (2000).