



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN ORIENTADO A LA OPERACIÓN MINA A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN MINERA ESCONDIDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

RODRIGO ANDRÉS NÚÑEZ CAROCA

PROFESOR GUÍA:
GONZALO DONOSO RECASENS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MANUEL SOTO OLMEDO
ROBERTO GONZÁLEZ GAZMURI

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil de Minas

Por: Rodrigo Andrés Núñez Caroca

Fecha: Septiembre, 2018

Profesor Guía: Gonzalo Donoso Recasens

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN ORIENTADO A LA OPERACIÓN MINA A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN MINERA ESCONDIDA.

Para toda operación minera, es de gran importancia el control del material particulado en suspensión, debido a sus efectos negativos en la salud de los operarios, en el medio ambiente, las comunidades cercanas y en el desempeño de la operación misma.

Los estudios sobre el material particulado en suspensión generado en faenas mineras declaran la importancia del monitoreo de la presencia en el aire de 3 tamaños distintos de partícula: MP1, MP2.5 y MP10, tamaños que marcan el valor máximo de su medida en [μm]. Estas partículas son muy peligrosas debido a su capacidad de asentarse en los alvéolos pulmonares, pudiendo desencadenar graves enfermedades respiratorias, como la Silicosis.

Para medir las concentraciones de material particulado en suspensión en Minera Escondida, se implementó una red de monitoreo ambiental, Esta red es capaz de medir los 3 tamaños más importantes de material particulado, temperatura ambiental y humedad relativa, dentro de otras.

Las mediciones se analizaron mediante sistemas de Aprendizaje Automático, capaces de analizar grandes bases de datos con distintas variables y encontrar relaciones en función del tiempo o entre variables. *Amazon Machine Learning* puede manejar extensos registros sin dificultades, entregando tendencias y comportamientos analizables que ayudaron a completar el estudio, además de simular escenarios deseados considerando las mismas tendencias.

Las mediciones arrojaron un notorio aumento de las concentraciones de polvo durante el turno noche, lo que se debe principalmente a la Inversión Térmica a la que está sometida la operación de Minera Escondida. En presencia de este fenómeno, la superficie del rajo se enfría rápidamente al caer la noche, y por ende enfría repentinamente el aire que está en contacto con ella. Esto produce que se encierre una capa de aire caliente entre dos capas frías, imposibilitando la salida del polvo debido a la fuerza de empuje por diferencias de densidades. Esto afecta a los operarios del turno noche, al estar sometidos a ambientes de polución hasta 10 veces mayor al turno día. Esto también afecta a la operación, al ralentizar al circuito de camiones de extracción debido a la baja visibilidad, generando que se realicen menos viajes de transporte de material a destino, bajando así la producción diaria en al menos un 15[%].

**ABSTRACT OF THE SUBMITTED THESIS TO OBTAIN
THE DEGREE OF: Mining Engineer
BY: Rodrigo Andrés Núñez Caroca
DATE: September, 2018
THESIS ADVISOR: Gonzalo Donoso Recasens**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF SUSPENDED PARTICULATE
MATERIAL ORIENTED TO MINE OPERATION FROM THE
IMPLEMENTATION OF AN ENVIRONMENTAL MONITORING
NETWORK IN MINERA ESCONDIDA.**

For all mining operations, controlling suspended particulate matter is of great importance, due to its negative effects on the health of operators, the environment, nearby communities and the performance of the operation itself.

Studies on suspended particulate matter generated in mining sites declare the importance of monitoring the presence in the air of 3 different particle sizes: PM1, PM2.5 and PM10, sizes that mark the maximum value of their measurement in [μm]. These particles are very dangerous due to their ability to settle in the pulmonary alveoli, which can trigger serious respiratory diseases, such as Silicosis.

To measure the concentrations of suspended particulate matter at Minera Escondida, an environmental monitoring network was implemented. This network is capable of measuring the 3 most important sizes of particulate material, environmental temperature and relative humidity, amongst others.

The measurements were analyzed by means of automatic learning systems, capable of analyzing large databases with different variables and finding relationships based on time or between variables. *Amazon Machine Learning* can handle extensive records without difficulties, delivering trends and analyzable behaviors that helped complete the study, as well as simulating desired scenarios considering the same trends.

The measurements showed a notable increase in dust concentrations during the night shift, which is mainly due to the Thermal Inversion to which the operation of Minera Escondida is subject. In the presence of this phenomenon, the surface of the pit cools quickly at nightfall, and therefore suddenly cools the air that is in contact with it. This causes a layer of hot air to be enclosed between two cold layers, making it impossible to expel the dust due to the pushing force due to density differences. This affects the operators of the night shift, being subjected to pollution environments up to 10 times greater than the day shift. This also affects the operation, by slowing down the extraction truck circuit due to low visibility, generating fewer trips to transport material to destination, thus lowering daily production by at least 15[%].

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por darme la oportunidad de estudiar la carrera que quería en una gran universidad; por darme las herramientas y la formación necesaria para ser el hombre que he llegado a ser; por acompañarme y guiarme en cada paso de este largo camino; por soportar mi mal genio en tiempos difíciles y por ser mi fuente de apoyo y ayuda constante en toda esta etapa. Mamá, papá y hermana: los amo mucho!

A Constanza, por ser mi apoyo incondicional durante estos años; por motivarme día a día a ser mejor persona, mejor estudiante y mejor profesional; por enseñarme a soñar en grande en todos los aspectos de la vida; por hacerme sentir especial día a día con tu amor y admiración. Gracias por cambiar mi vida! Te amo mucho!

A mis amigos, gracias por estar ahí en cada momento de mi vida; gracias por escuchar; por opinar; por darme su opinión; por ser parte de mi desahogo en tiempos difíciles; or estar ahí cada cumpleaños dándolo todo; cada viaje dándolo todo. Gracias por darme la oportunidad de decir que tengo amigos reales!

A cada miembro de la empresa Mine Bridges, gracias por quererme como parte de su equipo; por darme todas las herramientas para poder realizar mi memoria de título en una de las mineras más grandes del mundo; por enseñarme día a día a ser mejor profesional y a valorar el trabajo, gracias por ayudarme en cada requerimiento de trabajo!

A los señores Gonzalo Donoso y Manuel Soto, gracias por apoyarme en la etapa decisiva de mi carrera universitaria; por darme todo lo que necesitaba para realizar este trabajo; por la buena onda en cada reunión; por enseñarme día a día cómo trabajar; por compartir experiencias y enseñanzas que han sido de gran valor en mi desarrollo como un profesional, como persona, y como amigo.

Finalmente, gracias al básquetbol, mi fuente de inspiración a ser mejor, fuente de dolor y enseñanzas. Gracias por ser mi santuario, mi primera pasión; gracias por hacerme creer que quien se lo propone puede hacer lo que desee; por enseñarme más de lo que alguien pueda imaginar.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Objetivo general	3
1.3	Objetivos específicos	3
1.4	Alcances	3
2	Antecedentes.....	4
2.1	Material Particulado	4
2.2	Fuentes de emisión de material particulado en la operación minera a cielo abierto	5
2.3	Efectos de tener material particulado en suspensión	7
2.3.1	Efectos en la salud.....	7
2.3.2	Efectos en la operación	8
2.3.3	Efectos en infraestructura	9
2.4	Normativas de seguridad respecto del material particulado.....	9
2.5	Movimiento de material particulado en el aire	10
2.5.1	Temperatura, Humedad e Inversión Térmica	10
2.5.2	Movimiento Browniano	12
2.5.3	El viento y su efecto en el polvo en suspensión	13
3	Metodología.....	15
3.1	Definición de Variables Significativas	15
3.2	Análisis de Fuentes de Emisión de Material Particulado	15
3.3	Monitoreo de Variables	15
3.3.1	Humedad relativa y temperatura ambiental.....	17
3.3.2	Material particulado en suspensión	17
3.3.3	Velocidades CAEX	18
3.4	Análisis de datos.....	18
3.5	Machine Learning o Aprendizaje Automático	19
3.5.1	Partes del Aprendizaje Automático.....	19
3.5.2	Sistemas de Machine Learning Disponibles	20
3.5.3	Simulación de datos	21
3.6	Análisis de relaciones encontradas	22
4	Resultados y Discusión.....	24
4.1	Mediciones y Análisis.....	24
5	Conclusiones.....	36
5.1	Recolección de Antecedentes	36
5.2	Mediciones	36
5.3	Procesamiento de Datos	37

5.4	Resultados	37
6	Recomendaciones.....	39
6.1	Mediciones y estudios	39
6.2	Supresión de Material Particulado en Suspensión.....	39
7	Bibliografía.....	41
8	ANEXOS	42
8.1	Faena en estudio	42
8.2	Valores de Z para pruebas de hipótesis	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Comparación del tamaño de un cabello humano y de un grano de arena fina de playa con partículas PM1, PM2.5 Y PM10.....	5
Ilustración 2:	Esquema de actividades generadoras de material particulado en suspensión en operaciones rajo abierto.	6
Ilustración 3:	Perfil de temperatura del aire en un día común.	11
Ilustración 4:	Perfil de temperatura del aire en noches de inversión térmica.	12
Ilustración 5:	Movimiento Browniano de distintas partículas diferenciadas por color.....	13
Ilustración 6:	Modos de transporte aéreo de material particulado.	14
Ilustración 7:	Esquema de metodología general de trabajo.....	15
Ilustración 8:	Diagrama representativo de distribución de equipos de monitoreo.	16
Ilustración 9:	Diseño de sistema de medición y almacenamiento de datos.	16
Ilustración 10:	Rango operacional del sensor para humedad y temperatura.....	17
Ilustración 11:	Esquema de operación de Aprendizaje Automático.	19
Ilustración 12:	Gráfico prueba de hipótesis.....	22
Ilustración 13:	Mediciones de material particulado en suspensión en función de la hora del día.	24
Ilustración 14:	Mediciones de PM1 en suspensión en función de la hora del día.....	25
Ilustración 15:	Mediciones de PM2.5 en suspensión en función de la hora del día.....	25
Ilustración 16:	Mediciones de PM10 en suspensión en función de la hora del día.....	26
Ilustración 17:	Mediciones de la temperatura ambiental en función de la hora del día.	27
Ilustración 18:	Mediciones de la humedad relativa en función de la hora del día.	28
Ilustración 19:	Región de aceptación y rechazo para H_1 de tipo mayor que.....	31
Ilustración 20:	Región de aceptación y rechazo para H_1 de tipo menor que.....	35
Ilustración 21:	Ubicación de faena Minera Escondida.....	42
Ilustración 22:	Vista aérea rajo Escondida.....	42
Ilustración 23:	Vista aérea rajo Escondida Norte.....	43
Ilustración 24:	Diagrama de proceso productivo de Minera Escondida.	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características operacionales de sensores.....	17
Tabla 2: Comparación de Sistemas de Aprendizaje Automático Disponibles.....	20
Tabla 3: Tabla comparativa de velocidades CAEX según turno y condición de carguío....	29
Tabla 4: Tabla comparativa de velocidades CAEX según concentración de Material Particulado en Suspensión (MPS).....	32
Tabla 5: Tabla comparativa de velocidades CAEX del turno día, según concentración de MPS.....	34

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Hipótesis de comparación de medias turno día vs runo noche.	30
Ecuación 2: Prueba Z de diferencia de medias.	31
Ecuación 3: Prueba Z de comparación turno día vs noche, CAEX cargados.	31
Ecuación 4: Prueba Z de comparación turno día vs noche, CAEX descargados.	31
Ecuación 5: Hipótesis de comparación de velocidades medias con alto MPS y bajo MPS. 33	
Ecuación 6: Prueba Z de comparación bajo MPS vs alto MPS, CAEX cargados.	33
Ecuación 7: Prueba Z de comparación bajo MPS vs alto MPS, CAEX descargados.....	33
Ecuación 8: Hipótesis de comparación de velocidades medias 08-11 hrs y 11-20 hrs.....	35
Ecuación 9: Prueba Z de comparación 08-11 hrs u 11-20 hrs, CAEX cargados.	35
Ecuación 10: Prueba Z de comparación 08-11 hrs u 11-20 hrs, CAEX cargados	35

1 Introducción

1.1 Motivación

La minería es una actividad que se encuentra constantemente ante complicaciones, tanto internas como externas y en ocasiones, de ambos tipos al mismo tiempo. Dichos desafíos afectan al desempeño del negocio, al estado de relaciones referentes al medioambiente, las comunidades, y claramente la capacidad de mantener una operación segura. Es por esto que se debe pensar en el futuro y en cómo sobrellevar estas complicaciones.

Uno de los mayores desafíos en la operación minera es el de la generación de material particulado y su presencia en el aire dentro y fuera de los límites de la zona contemplada por el proyecto. Este problema no sólo afecta a los trabajadores en cuanto a la degradación irreversible de su salud, sino que también afecta al negocio en relación a su eficiencia.

Una de las prioridades de las compañías mineras hoy en día es la de combatir la Silicosis en los operadores, resultado de la aspiración de material particulado con contenido de Sílice, proveniente del cuarzo en la mayoría de los casos.

Por otro lado, la operación se ve afectada por el material particulado en suspensión de diversas formas; la principal corresponde al polvo presente en zonas de caminos mineros por donde transitan camiones transportando material, que fuerza al operario a reducir su velocidad, generando la ralentización del flujo de material a la siguiente etapa (conminución o botadero) y posibles accidentes por alcance o por poca visibilidad, entre otros.

Para lograr enfrentar el problema del material particulado presente en el aire, se debe entender de la mejor manera posible las fuentes de generación de éste, teniendo un sistema de control de las actividades en la mina y las mediciones de presencia del particulado en el aire para obtener una relación que presente las principales fuentes de generación.

Además, existe un fenómeno que mantiene el material particulado en el aire por un tiempo extendido en comparación con lo habitual, aunque no es generador de éste. Este fenómeno se denomina inversión térmica y actúa como una tapa de olla sobre la capa de contaminación en zonas encerradas por formaciones montañosas, como los valles. Esta geometría de sitio es la base de una operación minera a rajo abierto, por lo que será un factor fundamental en el trayecto del material particulado.

A partir de una red de monitoreo ambiental capaz de medir la concentración de material particulado PM1, PM2.5 y PM10 se podrá encontrar relaciones entre las actividades generadoras de material particulado con las que afectan en su presencia en el ambiente, de forma de entender el comportamiento del material particulado en suspensión, respecto de condiciones como temperatura y humedad, entre otras.

Esta información permitirá entender el efecto negativo del polvo en el circuito de carguío, donde los CAEX, o camiones de extracción, se ven obligados a reducir la velocidad, debido

a la baja visibilidad en los caminos por la presencia de polvo en suspensión. Al comparar las velocidades por lugares afectados con las de lugares sin este problema y la velocidad máxima permitida en caminos mineros, se podrá ver el tonelaje que se está dejando de transportar diariamente y por ende el beneficio que se está dejando de obtener.

Hoy, la única solución que logra disminuir el polvo en suspensión en caminos mineros corresponde al riego de estos mediante camiones aljibes. Esta solución no es muy eficiente, ya que el agua es absorbida cerca de unos 30 minutos después de hacer contacto con el suelo, debido a las altas temperaturas en zonas mineras. El regadío de caminos mineros es una actividad peligrosa, ya que su abuso creará barro, lo que constituye un gran riesgo para los equipos transportando más de 300 [ton] de material.

Un camino minero es un factor directo en el desempeño productivo de una operación minera, si no se tuvieran nubes de polvo suspendidas en zonas de tránsito de equipos, se podrían tener tiempos de transporte más bajos, lo que resulta en costos por tonelada transportada más bajos.

El mantener un camino minero en buen estado puede generar una disminución en las emisiones de material particulado, alargando su vida útil, incrementando tiempos entre mantenciones y disminuyendo costos en su mantención. Además, una menor resistencia del camino genera un aumento en la vida del neumático y componentes del camión y disminución del consumo de combustible.

De esta manera, se vuelve crucial actuar de inmediato y de forma efectiva contra la presencia de material particulado en el aire, desde su generación hasta su punto final, lo cual se puede lograr mejorando la sincronización entre actividades de supresión y actividades de generación de polvo, de manera de anticiparse a la diseminación del material en el aire.

1.2 Objetivo general

Analizar el efecto de la presencia de material particulado en zonas que contemplan caminos mineros sobre el desempeño del circuito de transporte de material.

1.3 Objetivos específicos

- Recolectar información sobre el material particulado, sus características, efectos, fuentes de emisión y normativas de seguridad.
- Análisis crítico de la información recolectada por medio del sistema de monitoreo de presencia de material particulado con respecto a las normativas de seguridad.
- Búsqueda de correlaciones entre condiciones ambientales (humedad y temperatura) y el comportamiento de la acumulación de material particulado en suspensión.
- Análisis del efecto del polvo en suspensión sobre las velocidades de los CAEX.

1.4 Alcances

Los datos y experiencias utilizadas corresponden a información obtenida en Minera Escondida, ubicada en la segunda región de Antofagasta, Chile. Los equipos de medición fueron instalados por la empresa MetBits, para la cual será realizado el presente estudio.

Las estadísticas provienen de la red de monitoreo ambiental implementada en la operación a rajo abierto de Minera Escondida, considerando desde septiembre de 2017 hasta febrero de 2018

Las pruebas y mediciones fueron realizadas durante estaciones de primavera y verano, por lo que el estudio sería aplicable a condiciones similares de temperatura, humedad y ritmo de operación.

El enfoque del estudio será evidenciar el comportamiento del material particulado en suspensión y su efecto en la disminución de velocidad de los CAEX al circular por caminos con baja visibilidad, de modo de conocer la cantidad de material que se deja de transportar desde el sitio de extracción a la fase siguiente.

2 Antecedentes

Para lograr comprender el comportamiento y el efecto del material particulado en la operación minera, es necesario entender qué es, cómo se clasifica y cómo se genera. Además será interesante analizar su comportamiento en relación a las condiciones de temperatura y humedad.

2.1 Material Particulado

El material particulado, más conocido como polvo, corresponde a elementos sólidos de diámetro entre 1-100 [μm], capaces de permanecer suspendidos en el aire durante cierto período de tiempo. Por otro lado, el Ministerio de salud de Chile (MinSal) define el polvo como “*partículas pequeñas emitidas a la atmósfera por elementos naturales, por procesos mecánicos o industriales, por transporte de materiales, demoliciones y otros*” (“Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica”, Ministerio de Salud de Chile, 1978).

La importancia del polvo radica en las complicaciones que puede traer, tanto para la salud como para la operación, debido a sus composiciones y finos tamaños. También es necesario considerar que, ya que el objetivo principal de la actividad minera consiste en la fragmentación de material rocoso, será inevitable que toda acción realizada dentro de labores de extracción y procesamiento genere material particulado en grandes o pequeñas cantidades, por lo que garantizar un espacio de trabajo libre de contaminación no es una tarea sencilla (Higueras y Oyarzún, 2005).

Según MinSal, la contaminación atmosférica corresponde a “*la presencia en el aire de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, en concentración o niveles tales que perjudiquen o molesten la vida, la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna o degraden la calidad del aire, de los bienes y de los recursos nacionales o de los particulares*”. Dentro de esto, se clasifica el polvo como un contaminante: “*toda sustancia química o sus compuestos o derivados, agentes físicos y biológicos que, al adicionarse al aire, pueden alterar o modificar sus características naturales o las del ambiente*” (“Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica”, Ministerio de Salud de Chile, 1978).

El polvo respirable comprende las partículas de diámetro aerodinámico, o tamaño por simplicidad, menor a 10 [μm]. Representa una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas partículas penetran a lo largo de todo el sistema respiratorio hasta los pulmones, pudiendo generar irritaciones y diversas enfermedades respiratorias (Higueras y Oyarzún, 2005).

El Ministerio del Medio Ambiente de Chile (MMA) clasifica los tamaños de material particulado de la siguiente manera:

- Material particulado grueso o PM10 (MP10 en español): de tamaño comprendido entre 10 [μm] y 2.5 [μm].

- Material particulado fino o PM2.5 (MP2.5 en español): de tamaño entre 2.5 [μm] y 1 [μm].
- Material particulado ultrafino o PM1 (MP1 en español): de tamaño menor a 1 [μm].

Las partículas respirables, que contienen a las finas y ultrafinas, son las más dañinas, ya que tienen la capacidad de asentarse en los pulmones, penetrando alvéolos y pudiendo insertarse en el torrente sanguíneo, generando severas complicaciones a la salud (ACHS).

En general, al tratarse de tamaños tan pequeños, es difícil imaginarse o dimensionarlos. Es por esto que, a continuación, se muestra una imagen que compara los tamaños PM2.5 y PM10 con un cabello humano y con un grano de arena fina (MMA).

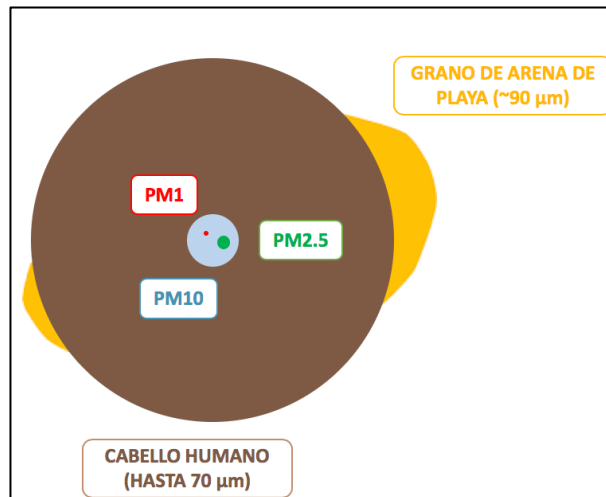


Ilustración 1: Comparación del tamaño de un cabello humano y de un grano de arena fina de playa con partículas PM1, PM2.5 Y PM10.

2.2 Fuentes de emisión de material particulado en la operación minera a cielo abierto

En una operación minera a rajo abierto se tienen diversas fuentes de emisión de material particulado, algunas en mayor proporción que otras. Durante el proceso de extracción, prácticamente toda actividad en contacto con el material liberará material particulado al ambiente. En la siguiente imagen se pueden ver las principales operaciones unitarias en una operación minera a cielo abierto que generan material particulado en suspensión:

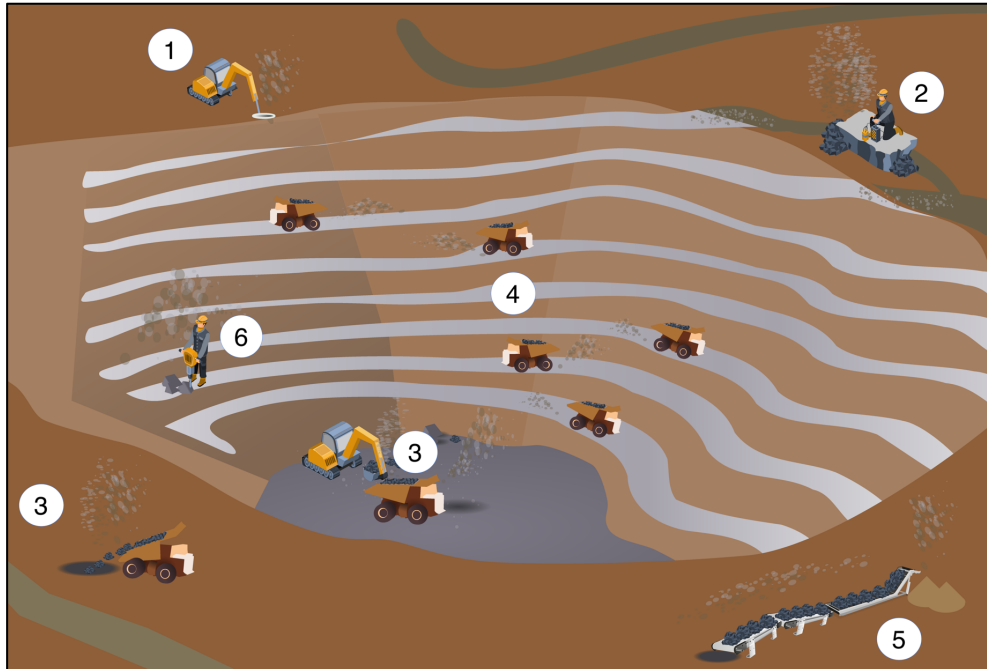


Ilustración 2: Esquema de actividades generadoras de material particulado en suspensión en operaciones rajo abierto.

Como se puede ver en la imagen anterior, las principales actividades que generan polvo en suspensión en una operación a rajo abierto son:

- 1) Perforación: La interacción entre el bit y la roca resulta en la trituración de la roca, lo que libera fragmentos muy pequeños capaces de mantenerse suspendidos en el aire.
- 2) Tronadura: El tamaño de las explosiones genera grandes nubes con altas concentraciones de polvo, las que contienen grandes cantidades de polvo PM1, PM2.5 y PM10, que quedarán en suspensión por prolongados períodos de tiempo.
- 3) Carga y descarga: El manejo de material que realizan los equipos de carguío libera siempre material al levantarlo y depositarlo en la tolva del CAEX. A su vez, este último deberá descargar el material en destino, lo que constituye más generación de polvo en suspensión.
- 4) Transporte en equipos móviles: Actividad generadora de polvo que se realiza con mayor frecuencia durante la operación minera. El contacto del neumático de los CAEX (y otros equipos) con el camino genera partículas diminutas de roca. El resultado puede ser la generación de elementos tan pequeños que son capaces de mantenerse suspendidos en el aire por tiempos prolongados.
- 5) Transporte en cinta transportadora: Este equipo basa su funcionamiento en la tensión de la correa, ésta a su vez genera vibraciones constantes durante el transporte de material. Dichas vibraciones provocan interacción entre las rocas, generando polvo que se mantiene en suspensión con la ayuda del viento y movimiento de la correa.
- 6) Otras acciones: toda acción que tenga como fin reducir el tamaño de elementos rocosos será generadora de polvo en suspensión, algunas en mayor grado que otras.

2.3 Efectos de tener material particulado en suspensión

Los efectos de la presencia de material particulado en suspensión se pueden ver tanto en la salud de los trabajadores expuestos a este como en los índices avanzados de producción.

2.3.1 Efectos en la salud

En la minería, una de las enfermedades más comunes es la Silicosis, cuyo principal responsable es el material particulado en suspensión en ambientes de trabajo.

La silicosis es una enfermedad pulmonar crónica, incurable e irreversible, que produce insuficiencia respiratoria. Su principal causa corresponde a respirar sílice cristalina, que ingresa a través de las vías respiratorias. Este material se va acumulando con el tiempo y dificulta cada vez más la respiración.

La sílice libre cristalizada (SiO_2) es el principal componente del cuarzo, uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre y en casi todos los yacimientos minerales. La presencia de este material particulado en el aire es común en actividades de perforación, voladuras, carguío de mineral, conminución y otras operaciones en yacimientos que contienen minerales como Cristobalita y Tridimita.

Las etapas iniciales de la enfermedad no se caracterizan por presentar síntomas, pero a medida que avanza la enfermedad, el paciente va cansándose cada vez más fácilmente ante cualquier esfuerzo y aparecen problemas para respirar. Dado esto, la forma de encontrar la infección es a través de exámenes radiológicos. Según la ACHS, el tiempo que le toma a un paciente enfermarse depende de diversos factores, incluyendo:

- Concentración de sílice libre cristalizada en el material extraído
- Cantidad de material particulado en suspensión al que se está expuesto
- Tiempo de exposición
- Tamaño de partículas inhaladas
- Vulnerabilidad del operario

Nadie es inmune a la silicosis, algunas personas tendrán mayor resistencia que otras, pero si no se usan las protecciones correspondientes, toda persona expuesta puede contraer la enfermedad. Las ocupaciones que requieren exposición por parte del operador a ambientes con sílice cristalina en suspensión son la minería, la metalurgia y la construcción. De contraer la enfermedad, el trabajador deberá abandonar su trabajo especializado y desempeñarse en otra área, donde no se encuentre expuesto a sílice suspendida en el aire, de modo de no agravar la enfermedad.

Para la prevención de esta enfermedad, la Asociación Chilena de Seguridad recomienda algunas medidas de control aplicables a la operación minera:

- Siempre perforar en húmedo, nunca en seco
- No traspasar material desde gran altura mediante caídas, ya que genera un exceso de polvo
- Planificar tronaduras considerando el tiempo de exposición al polvo en suspensión y a gases creados en la tronadura
- Utilizar agua en forma de neblina para humectar la marina posterior al disparo
- Aplicar otros métodos de supresión en actividades específicas de extracción
- Usar los equipamientos de protección personal correspondiente en todo momento en que se pueda estar expuesto a estas condiciones

Según MinSal, cada vez que se ingrese un trabajador a la empresa minera donde se desempeñará en tareas expuestas a sílice cristalizada debe ser ingresado a un programa de vigilancia de salud y realizar una evaluación inicial (Protocolo de Vigilancia del Ambiente de Trabajo y de la Salud de los Trabajadores con Exposición a Sílice, Ministerio de Salud, 2015).

Desde el inicio de las tareas, los trabajadores deben someterse a evaluaciones médicas periódicas, que dependerán de los niveles, así como del tiempo de exposición. A continuación, se resumen las condiciones, dependiendo de si se cuenta con medición ambiental de sílice o no.

2.3.2 Efectos en la operación

La extracción de mineral requiere la voladura de bancos, de manera de fragmentar el mineral y retirarlo. Este proceso es un gran contribuyente de material particulado en suspensión, ya que las fuerzas expansivas generadas por los explosivos tienen una gran capacidad de fragmentación, generando una granulometría con presencia de partículas muy finas, que saldrán eyectadas desde el banco a la atmósfera (Higueras y Oyarzún, 2005).

Posterior a la tronadura de banco, se procede a extraer mediante un equipo de carguío (pala o cargador frontal) que tomará la marina y la depositará en la tolva del camión.

El camión deberá transportar su carga hacia la próxima etapa, sea conminución, *stockpile*, o a botadero. Para ello los camiones transitan por caminos mineros que conectan los bancos con la planta o botadero y están formados por material de suelo, estéril o mineral.

Los caminos mineros tienen una directa relación con el ritmo de producción y con la productividad, también componen una gran parte de los costos de operación. El costo por tonelada dependerá de qué tan rápido se termine el ciclo de carga-transporte-descarga, por lo que el camino transitado debe ser considerado como un activo (Halles, 2015).

Dado el paso del camión cargador sobre el camino, y debido a la composición de este, se es inevitable una pulverización del material en superficie, lo que se puede ver en muestreos de caminos construidos con un 10[%] de finos en su superficie que termina aumentando hasta un 60[%] (Araneda, 2016).

Una disminución en la frecuencia de camiones que llegan a su destino influirá en el cumplimiento de las metas diarias, lo que puede significar una gran pérdida para el negocio si la disminución es notoria y repetitiva (Rodríguez, 2013). Dado esto, toda disminución de concentración de material particulado en el aire agregaría valor al negocio.

2.3.3 Efectos en infraestructura

Estas partículas suspendidas, al ser tan pequeñas, son capaces de incrustarse en los lugares más recónditos de una operación minera. Desde un equipo de aire acondicionado en algún sector de la mina hasta el motor de una camioneta, causando considerable abrasión en sus componentes, lo que puede dañar los equipos de extracción. Esto es conocido más comúnmente como corrosión de componentes o estructuras, lo que puede ocasionar un aumento significativo en costos de mantención e incluso problemas mayores de estabilidad de edificaciones y severos daños a equipos si no se realiza la mantención correspondiente a tiempo.

Es esencial, para disminuir la tasa de desgaste de equipos y edificaciones, la disminución de material particulado en suspensión que pueda afectar los tiempos entre mantenciones de manera negativa. Si se está teniendo corrosión excesiva de activos, es necesario analizar los niveles de presencia de material particulado en el aire y actuar acorde a las necesidades. (Impactos de la Minería en el Medio Natural, Universidad Complutense de Madrid, 2010)

2.4 Normativas de seguridad respecto del material particulado

En el ámbito de la presencia de material particulado en el aire dentro de lugares de trabajo en operaciones mineras se tienen tres artículos importantes a considerar, que corresponden a normas dictadas por cualquier autoridad sobre los asuntos o negocios de su competencia.

a) Artículo 2° del D.S. 59, publicado en 1998 y actualizado en 2001

Permite valores de no más de 150 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] como concentración de 24 horas de material particulado respirable PM10. Lo anterior corresponde al promedio aritmético de las mediciones de concentración por estación monitorea en 24 horas consecutivas. En cualquier caso, el mínimo de horas para considerar en este promedio es 18.

b) Artículo 4° del D.S. 12, publicado en 2011 y actualizado en 2013

Para el caso del material particulado fino respirable PM2.5, se considera fuera de la norma si se tiene el percentil 98 de las medias diarias de un año sobre los 50 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$] o si el promedio tri-anual de los promedios anuales superan los 20 [$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$].

c) Artículo 66 del D.S. 594, publicado en 1999

Deja en claro los límites permisibles ponderados para distintos polvos a los cuales se puede someter un trabajador, dentro de otros:

- Cuarzo: Fracción respirable no debe superar los 0.08 [mg/m³].
- Cristobalita: Fracción respirable no debe superar los 0.04 [mg/m³].
- Tridimita: Fracción respirable no debe superar los 0.04 [mg/m³].
- Polvos no clasificados: Fracción respirable no debe superar los 2.40 [mg/m³], total no debe superar los 8.00 [mg/m³].

Estos límites pueden excederse por momentos, pero no pueden superar un valor de 5 veces el límite propuesto. Dichas situaciones en que se exceden los límites no deben repetirse más de 4 veces en la jornada diaria ni más de una vez en una hora.

Finalmente, cabe notar que la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) reconoce a la sílice como un agente cancerígeno, lo que implica un mayor riesgo para los operadores expuestos a estas condiciones.

2.5 Movimiento de material particulado en el aire

Para entender el comportamiento del material particulado en suspensión dentro de una mina a cielo abierto es necesario comprender algunos fenómenos que, en parte, gobernarán el desplazamiento de dichas partículas en la atmósfera de operación.

2.5.1 Temperatura, Humedad e Inversión Térmica

Dado que se está analizando el material particulado capaz de suspenderse en el aire y los factores que aportan en su ocurrencia, sería de gran utilidad analizar las capas de aire y su comportamiento dentro del rajo.

En un día común se tienen los siguientes eventos que controlan la temperatura del aire y la humedad relativa:

1. Al salir el sol, los rayos UV viajan hasta la superficie terrestre y logran calentarla.
2. El aire que está en contacto directo con la superficie comienza a aumentar su temperatura.
3. Dado que, a mayor temperatura, el aire tiene menor densidad, la capa que se va calentando cerca de la superficie comienza a ascender.
4. El aire frío que aun no está en contacto con la superficie comienza a descender debido a su mayor densidad, y comienza a aumentar su temperatura.
5. Al pasar las horas, comienza a crearse un perfil de temperatura del aire estable e inversamente proporcional a la altura. Todo esto mientras los pasos 1-4 están permanentemente ocurriendo.

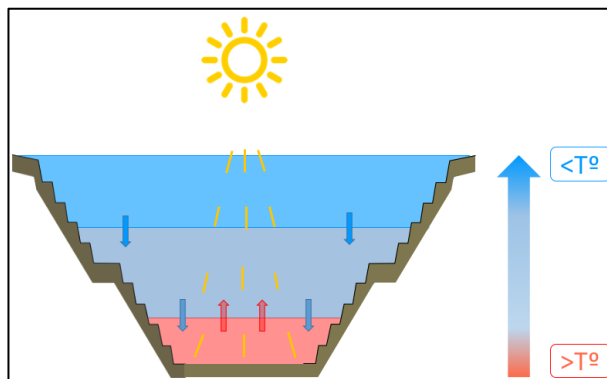


Ilustración 3: Perfil de temperatura del aire en un día común.

6. Al caer la noche, la superficie comienza a enfriarse controladamente, y por ende el aire en contacto con ella también, mientras lo que queda de aire caliente asciende y se mezcla con aire frío.
7. Finalmente, durante la noche, se tiene una disminución de la temperatura del aire a medida que aumenta la altura

Estudios meteorológicos han encontrado que, dentro de zonas encerradas por altas estructuras geológicas, como son las ciudades tipo valle (como Santiago de Chile) y las faenas mineras a cielo abierto, se da un fenómeno llamado Inversión Térmica, el cual cambia el perfil normal de temperatura versus altura mostrado anteriormente al caer la noche. A continuación, se exponen los eventos que definen la Inversión Térmica (retomando en el evento #6):

6. Al anochecer, se tiene una disminución muy rápida de la temperatura de la superficie, por lo que el aire que está en contacto con la superficie se enfría a una tasa mucho mayor que la normal, permitiendo que sólo parte del aire caliente ascienda.
7. El aire caliente alcanza a ascender y bajo éste se forma una capa de aire frío que tiende a quedarse ahí debido a que la gravedad tiene un mayor efecto sobre él.
8. A su vez la capa de aire más frío que se encuentra en la parte superior (sobre la capa de aire caliente) tiende a presionar a la capa caliente como una tapa de olla debido a su mayor densidad.
9. El aumento de presión sobre la capa de aire caliente, provoca una disminución lenta de su temperatura, su mantención, o incluso un aumento de ella.
10. En ocasiones, la capa de aire inferior presentará mayores niveles de humedad al ocurrir este fenómeno, pudiendo generarse neblina en grandes áreas.

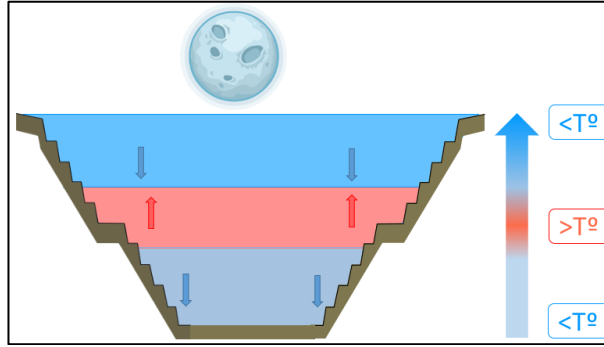


Ilustración 4: Perfil de temperatura del aire en noches de inversión térmica.

Al ocurrir este fenómeno, se anula toda circulación de viento, ya que la única vía de escape (ascendiendo) ha sido bloqueada por la capa de aire más frío. Al no haber circulación de viento, todo el material particulado en suspensión generado por actividades mineras no podrá escapar y se acumulará en la capa más cercana a la superficie, creándose nubes de polvo en cerca de las áreas de su generación, principalmente caminos mineros. De esta manera, la Inversión Térmica es una de las grandes responsables de los aumentos de niveles de polución en operaciones mineras a cielo abierto.

Lo mismo ocurre en ciudades como Santiago de Chile, donde al darse el fenómeno de Inversión Térmica, toda la polución generada por las industrias se acumula en el aire sin poder escapar.

Al amanecer, se tiene la capa de aire más cercana a la superficie con altos niveles de material particulado en suspensión, lo que va disminuyendo al pasar las horas y formarse un perfil de temperatura común con circulación de aire desde el fondo hasta la cima, bajando los niveles de polución cercanos a la superficie.

2.5.2 Movimiento Browniano

El físico francés Jean Perrin (1870-1942), galardonado con el Premio Nobel de Física de 1926, ha descrito este fenómeno como: *"En un fluido en equilibrio, como el agua dentro de un vaso, todas sus partes aparecen completamente sin movimiento. Si ponemos en el agua un objeto de mayor densidad, cae. La caída, es cierto, será más lenta si el objeto es menor; pero un objeto visible siempre termina en el fondo del vaso y no tiende a subir. Sin embargo, sería difícil examinar durante mucho tiempo una preparación de partículas muy finas en un líquido sin observar un movimiento perfectamente irregular. Se mueven, se detienen, empiezan de nuevo, suben, bajan, suben otra vez, sin que se vea que tiendan a la inmovilidad."*

La descripción anterior es análoga al caso de material particulado suspendido (objetos de menor densidad) en el aire (fluido), donde el polvo tiene un movimiento en zigzag o aleatorio. En general, esto ocurre ya que en un gas la rapidez de las moléculas es tan alta que, al chocar, se mueven en todas direcciones rápidamente.

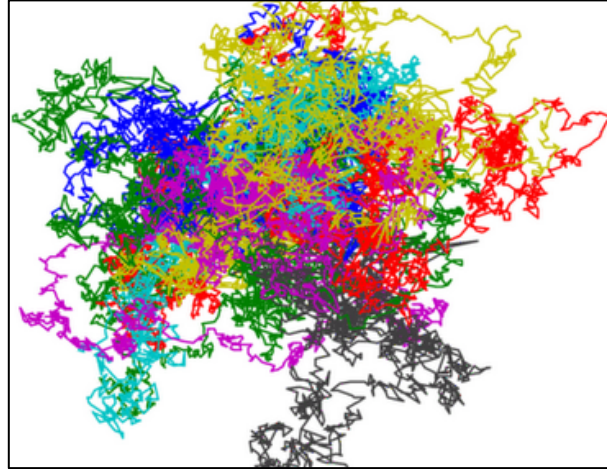


Ilustración 5: Movimiento Browniano de distintas partículas diferenciadas por color.

De esta manera, las partículas siguen una trayectoria continua pero irregular, impredecible y sólo pueden ser monitoreadas mediante equipos especiales.

Aunque es prácticamente imposible predecir los movimientos de partículas individuales, sí es posible predecir el movimiento de masas agregadas de partículas, lo que será esencial en el presente estudio

2.5.3 El viento y su efecto en el polvo en suspensión

La fragmentación ocasionada por la interacción entre el neumático del camión y las partículas del camino minero ocurre, en general, en presencia de viento. Es esta la razón principal de por qué existe la dispersión de polvo y posteriormente la contaminación (Higuera y Oyarzún, 2005).

La partícula se mueve desde el suelo de distintas maneras al ser afectadas por la acción del viento, dependiendo de la velocidad del viento (rapidez y dirección), la turbulencia del flujo y la creada por el paso del camión, comenzando con el proceso de saltación, las más pequeñas (<20 [µm]) pueden entrar en una suspensión de largo plazo; las que están entre 20-70 [µm] se suspenderán por un período más corto. Para tamaños entre 70-100 [µm] entrarán en una saltación modificada, que se ve afectada rebotando en el suelo hasta mantenerse estática en el suelo. Para grandes partículas, está primeramente la saltación y posteriormente arrastre y reptación (>500 [µm]) (Nickling y McKenna, 2009).

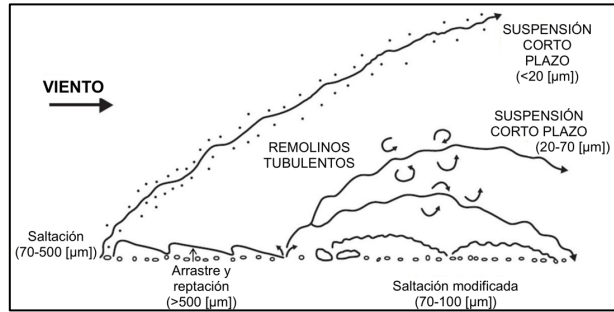


Ilustración 6: Modos de transporte aéreo de material particulado.

De esta manera el viento facilita el transporte de polvo, su suspensión y dispersión, contribuyendo a la contaminación en la mina.

3 Metodología

El proyecto cuenta con 6 etapas, cada una esencial en el objetivo de encontrar opciones para agregar valor a la operación:



Ilustración 7: Esquema de metodología general de trabajo.

3.1 Definición de Variables Significativas

Para lograr realizar un estudio robusto y válido, será necesario analizar los antecedentes y revisión bibliográfica y encontrar las variables que tienen mayor efecto en el objeto de estudio. De esta manera, el modelo de aprendizaje automático será más sencillo y se podrán obtener relaciones más claras entre variables.

3.2 Análisis de Fuentes de Emisión de Material Particulado

Para poder analizar el comportamiento del material particulado en suspensión, será necesario identificar las actividades con mayor incidencia en la generación de polvo, considerando que prácticamente toda actividad de extracción tiene responsabilidad en su formación.

3.3 Monitoreo de Variables

Para poder encontrar relaciones entre las variables relevantes, el sistema de *Machine Learning* debe ser entrenado en base a datos históricos que le permitan identificar tendencias y comportamientos. Para esto, se analizarán variables meteorológicas y operacionales a lo largo del tiempo. Las mediciones durarán desde septiembre de 2017 hasta febrero de 2018. Dentro de ellas se tiene:

- Temperatura Ambiental
- Humedad Relativa
- PM1
- PM2.5
- PM10
- Velocidades CAEX

Para esto se instaló en Minera Escondida un completo sistema de última tecnología en monitoreo de calidad ambiental, capaz de obtener diversas medidas que ayudarán a observar el comportamiento del material particulado y de transmitirlos a una nube de datos controlada y monitoreada remotamente.

Los equipos de medición, montados en estaciones móviles con mástiles que alcanzan los 3[m] de altura, cuentan con el protocolo *LoRa*, red local, nacional o mundial de bajo consumo energético diseñada para equipos inalámbricos a batería, lo que le permite al sistema transmitir sus mediciones a un equipo concentrador equipado con tecnología celular 3G, de

modo de poder acceder a los datos remotamente sin complicaciones a través de una plataforma web, y con una base de datos local para contar con un nivel extra de seguridad.

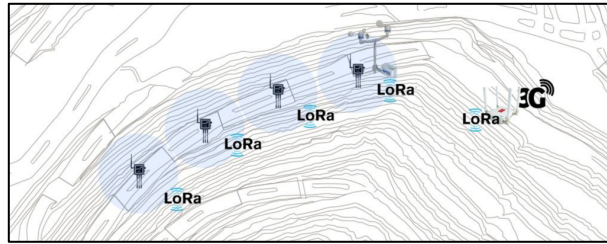


Ilustración 8: Diagrama representativo de distribución de equipos de monitoreo.

El equipo concentrador está formado por un enrutador que desempeña tareas de puertas de enlace para los sensores instalados y está ubicado en un gabinete diseñado para garantizar su desempeño en arduas condiciones como lo son en una mina a rajo abierto.

Este enrutador permite hasta 50 conexiones simultáneas sin perder calidad de recepción, por lo que se pueden tener aún más estaciones de monitoreo conectadas al mismo enrutador.

Además, cada sensor y equipo cuenta con un panel solar y batería interna, lo que lo hace un sistema completamente autónomo, sin presentar gastos al obtener mediciones. En el caso de quedarse sin energía, se reiniciará automáticamente y comenzará a transmitir mediciones apenas reciba carga, ya sea por el cargador solar o una fuente aplicada manualmente.

El sistema concentrador, al contar con tecnología 3G, recibe los datos de los sensores instalados y los transmite directamente a una plataforma web y una base de datos externa mediante el uso de direcciones ip y puertos dedicados. Finalmente, conectado al equipo concentrador, se encuentra una base de datos local donde se guardan todos los datos en caso de una conexión inestable.

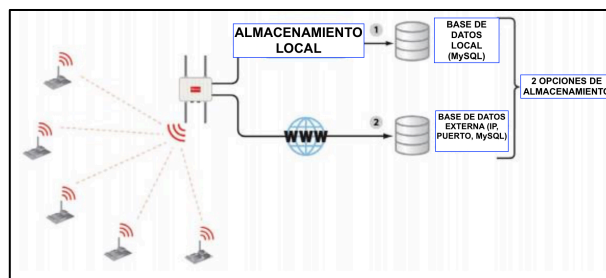


Ilustración 9: Diseño de sistema de medición y almacenamiento de datos.

Al quedar las mediciones almacenadas y organizadas por momento de medición, se pueden utilizar para crear una visión histórica de las mediciones a lo largo del tiempo y aprender de ellas relacionándolas con datos meteorológicos y actividades de explotación en el rajo.

A continuación, se describirán las mediciones que puede obtener el sistema, sus condiciones y resultados.

3.3.1 Humedad relativa y temperatura ambiental

Para estas 3 variables, se utilizará el mismo sensor digital, que funciona dentro de los siguientes rangos de operación:

Tabla 1: Características operacionales de sensores.

Especificación/Sensor	Temperatura	Humedad Relativa
Rango Operacional	-40 a +85 [°C]	0 a 100 [%] HR -40 a +85 [°C]
Rango con Completa Precisión	0 a +65[°C]	-
Histéresis	-	±1 [%] HR
Precisión	±1 [°C]	< ±3 [%] a 25 [°C] 20-80 [%] HR.
Tiempo de Respuesta	1.65 [s]	1 [s]
Consumo Típico	1 [µA] en proceso de medición.	1.8-2.8 [µA] en proceso de medición

En la siguiente imagen se grafica el área comprendida entre los ejes de temperatura y humedad relativa en que el sensor digital funciona con máxima precisión.

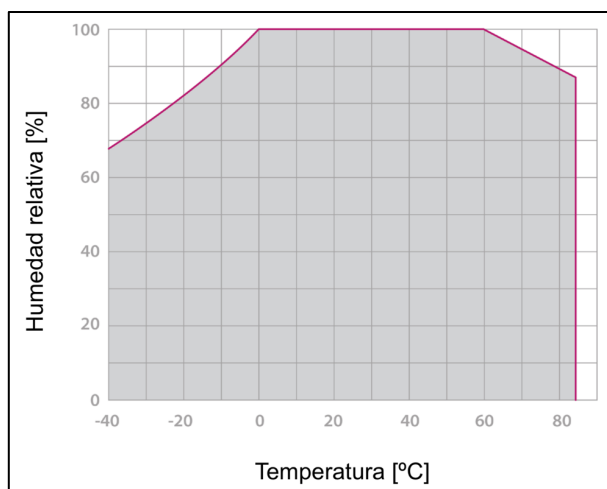


Ilustración 10: Rango operacional del sensor para humedad y temperatura.

De esta forma, el sensor proveerá constantemente los resultados de temperatura en [°C] y humedad relativa del aire en [%].

3.3.2 Material particulado en suspensión

El material particulado en suspensión es medido mediante un sensor, conocido como “sensor de polvo”, que ha sido integrado en el sistema de red de monitoreo ambiental. Este sensor

permite medir concentraciones de PM1, PM2.5 y PM10 en el aire, entregando valores de densidad según las unidades [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Tiene un rango de operación de 0.5 a 16 [μm] de diámetro de partícula, con 16 pasos que vienen calibrados de fábrica. Su gasto energético máximo está ligeramente sobre 200 [mA].

Dichos sensores se han implementado a lo largo de 4 estaciones de monitoreo ambiental separadas por 250 [m], aunque su rango de representatividad es de hasta 700 [m] en caminos rectos (Rumania, 2013), esto dado que se monitorea una red de caminos y se necesita mayor precisión para un buen análisis de datos. Según los estándares de Canadá (*Canada-wide Standards, 2011*), el sistema de monitoreo de partículas PM2.5 debe ubicarse a una distancia del suelo mínima de 2 [m] y máxima de 15 [m], por ende, todas las mediciones de polvo provendrán de la misma altura.

El sensor de material particulado en suspensión tiene certificación de protección IP65 contra polvo y agua, junto con un intervalo de temperatura de $-30[^\circ\text{C}]$ a $70[^\circ\text{C}]$, lo que lo hace perfecto para trabajar en las condiciones propuestas para el proyecto.

3.3.3 Velocidades CAEX

Minera Escondida mantiene un monitoreo de rutas, ubicación y velocidades de cada camión, los que serán históricos y en tiempo real (con cierto desfase), mediante la tecnología GPS instalada en cada equipo y conectada al sistema central de despacho de Minera Escondida. Con lo anterior, es posible filtrar los datos de velocidades, considerando las zonas de medición de la concentración de material particulado y los horarios en los que el equipo atraviesa dichas zonas, de forma de obtener una relación entre la presencia de MP en suspensión y la velocidad de los CAEX en dichas zonas.

Los datos de velocidades son obtenidos puntualmente cada vez que un CAEX pasa por la zona considerada en las mediciones y cuando el sistema de control de la empresa MODULAR informa la velocidad del CAEX. Por lo que, los datos son extremadamente puntuales, lo que quita de las opciones el poder generar un perfil de velocidad del equipo, que serviría para ver el comportamiento de la velocidad antes, durante y después de atravesar zonas con alta concentración de polvo en suspensión.

3.4 Análisis de datos

Al obtener las mediciones, se analizarán los comportamientos de temperatura, humedad relativo y concentraciones de polvo en suspensión según el tiempo, lo que permitirá identificar momentos y eventos relevantes para el estudio de relaciones con aprendizaje automático. Se compararán diversos escenarios que ayuden a identificar de mejor manera el efecto del material particulado en suspensión sobre el circuito de transporte, como turno día versus turno noche, horarios con mayor concentración de polvo versus horarios con baja presencia entre otros.

3.5 Machine Learning o Aprendizaje Automático

El aprendizaje automático contempla diversas técnicas de ciencia de datos (extracción generalizada de conocimiento a partir de información) que permite a equipos o sistemas computarizados utilizar grandes bases de datos para encontrar tendencias, resultados y predicciones de comportamiento. De esta manera, se elimina la necesidad de programar explícitamente comportamientos o acciones, sino que, al ver los datos como ejemplos, el software puede aprender por “experiencia”.

3.5.1 Partes del Aprendizaje Automático

Los sistemas de *Machine Learning* tienen 3 componentes principales, que trabajan en conjunto para alcanzar el objetivo planteado. Estos componentes son el Modelo, los Parámetros y el Aprendiz (*Learner*). El Modelo es el sistema que realiza las predicciones e identificaciones. Los Parámetros engloban las señales o factores que pueden ser usados, por el Modelo, para tomar decisiones. Finalmente, el Aprendiz es el sistema que ajusta los parámetros, y por ende el modelo, mientras ve las diferencias en predicciones versus el resultado real.

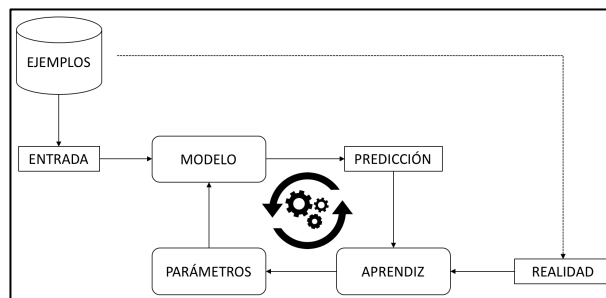


Ilustración 11: Esquema de operación de Aprendizaje Automático.

Todo comienza con el modelo, una predicción que el sistema de aprendizaje automático usará. Inicialmente, se debe asignar el modelo al sistema, lo que requiere intervención humana en la mayoría de los casos. El modelo en sí depende de los parámetros usados para realizar los cálculos. En general, el sistema de aprendizaje automático reconoce patrones y tendencias dentro de los datos. De esta manera, se va enseñando a sí mismo el comportamiento de los datos y las correlaciones entre sí. Por ejemplo, si las mediciones fueran de presión atmosférica según la altura sobre el nivel del mar, el sistema entendería, al analizar una cantidad suficiente de datos, que la presión atmosférica disminuye al aumentar la altura. A partir de esta hipótesis es capaz de realizar predicciones simples, según se necesiten.

Todas las relaciones entre datos, comportamientos dependientes y tendencias se pueden expresar en forma de ecuaciones matemáticas. Esto es exactamente lo que hace el aprendizaje automático, genera modelos matemáticos que describen el comportamiento de los datos, de manera de poder predecir comportamientos en casos específicos.

El aprendiz es el componente encargado de comparar la definición del modelo con los datos obtenidos en las mediciones, de manera de encontrar diferencias e integrar al modelo las observaciones encontradas. Lo anterior puede ser descrito como aprendizaje.

En resumen, *Machine Learning* funciona creando un modelo definido de comportamiento, luego se integran datos de experiencia al aprendiz quien estudiará los parámetros para mejorar el modelo.

3.5.2 Sistemas de Machine Learning Disponibles

En la actualidad, existen muchas formas de crear y utilizar sistemas de Aprendizaje Automático. La creación de ellas ya es un desafío para los entendidos en la materia, y se escapa de los alcances de este trabajo. Es por esto, que se analizaron distintos sistemas disponibles de Machine Learning, realizando una tabla comparativa que analiza las cualidades más importantes de los sistemas de Aprendizaje Automático:

Tabla 2: Comparación de Sistemas de Aprendizaje Automático Disponibles.

	Amazon ML	Amazon SageMaker	Microsoft Azure ML Studio	Google Prediction API	Google ML Engine
Clasificación	✓	✓	✓	✓	✓
Regresión	✓	✓	✓	✓	✓
Clustering	✗	✓	✓	✗	✓
Detección de Anomalías	✗	✓	✓	✗	✓
Recomendaciones	✗	✓	✓	✗	✓
Ranking	✗	✓	✓	✗	✓
Algoritmos	Desconocidos	10 integrados	+100 algoritmos y módulos	Desconocidos	Basado en TensorFlow
Interfaz Gráfica	✗	✓	✓	✗	✗
Nivel de Automatización	Alto	Medio	Bajo	Alto	Bajo
Costo	Gratis bajo prueba	Prueba básica gratis	Pagado	Gratis bajo prueba	Pagado
Nivel de Conocimiento Previo Necesario	Bajo	Bajo	Alto	Alto	Medio

La frecuencia de medición del sistema implica una gran base de datos mensual, por lo que debe ser analizada de manera ordenada y eficiente. Se ordenaron los datos por estación, luego por tipo de medición y finalmente por mes.

Dado que los sensores están constantemente midiendo y registrando condiciones de material particulado, viento, temperatura y humedad (entre otros), se tiene una gran cantidad de registros. Esta gran base de datos no puede ser analizada eficientemente mediante planillas de Microsoft Excel o softwares similares, sino que deberán ser procesados y analizados con sistemas de Aprendizaje Automático.

Realizando un estudio de sistemas de *Machine Learning* disponibles, se encontró la opción de *Amazon Web Services: Machine Learning*, una plataforma online de aprendizaje automático con interfaz de usuario simple y amigable, gracias a la cual no se necesita ser experto en códigos de aprendizaje automático.

El análisis realizado por el sistema corresponde a la búsqueda de relaciones entre las siguientes variables relevantes:

- Material Particulado PM1 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Material Particulado PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Material Particulado PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
- Humedad Relativa [%]
- Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
- Velocidades CAEX en caminos con sensores

El fin de este trabajo es entender el comportamiento del material particulado en condiciones impuestas por las variables mencionadas anteriormente, incluyendo relaciones entre los distintos tamaños de material particulado, la variación de concentración en el aire según la velocidad y dirección del viento, el efecto de la temperatura y humedad en la permanencia del polvo en el aire, dentro de otros.

Además, se incluirán los registros de batería de las estaciones en el análisis, de manera de considerar posibles períodos sin mediciones debido a que la recarga de batería mediante energía solar no fue exitosa.

Finalmente, se analizarán las velocidades de los CAEX al momento de atravesar las nubes de polvo suspendido que han sido medidas por las estaciones, encontrando la tasa de disminución de cargas que llegan a destino cuando se tienen altas concentraciones de polvo en el ambiente con respecto a los períodos con bajas concentraciones.

3.5.3 Simulación de datos

La idea principal del uso de Aprendizaje Automático se basa en su capacidad de aprender de experiencias, de manera de poder realizar predicciones de acuerdo a las condiciones estudiadas. Este módulo de *Machine Learning* se utiliza en general para estudiar condiciones distintas a las reales, de manera de predecir tendencias de datos no provenientes de la realidad. Por otro lado, otra gran utilidad de este módulo consiste en la capacidad de simular datos en las mismas condiciones, considerando el paso del tiempo. De esta manera, el Aprendizaje Automático ayuda a obtener más datos que se ajustan a las condiciones de los casos reales, mejorando así la representatividad de los datos, y por ende se podrán obtener conclusiones más realistas.

3.6 Análisis de relaciones encontradas

Luego de analizar los datos obtenidos y las relaciones encontradas entre ellos, será necesario someter a prueba las conclusiones recogidas. Para esto, existen métodos estadísticos que evaluarán si las hipótesis (relaciones entre variables) son correctas o no.

Una prueba de hipótesis es una regla que especifica si se puede aceptar o rechazar una afirmación acerca de una población dependiendo de la evidencia proporcionada por una muestra de datos.

Una prueba de hipótesis examina dos hipótesis opuestas sobre una población: la hipótesis nula (H_0) y la hipótesis alternativa (H_1). La hipótesis nula es el enunciado que se probará. Por lo general, la hipótesis nula es un enunciado de que "no hay efecto" o "no hay diferencia".

La hipótesis alternativa es el enunciado que se desea poder concluir que es verdadero de acuerdo con la evidencia proporcionada por los datos de la muestra. Con base en los datos de muestra, la prueba determina si se puede rechazar la hipótesis nula.

Un error común de percepción es que las pruebas estadísticas de hipótesis están diseñadas para seleccionar la más probable de dos hipótesis. Sin embargo, al diseñar una prueba de hipótesis, se establece la hipótesis nula como lo que se desea desaprobar.

Puesto que se establece un nivel de significancia (error máximo que se está dispuesto a aceptar) pequeño antes del análisis (por lo general, un valor de 5[%] funciona adecuadamente), cuando se rechaza la hipótesis nula, se tiene prueba estadística de que la hipótesis alternativa es verdadera. En cambio, si no se puede rechazar la hipótesis nula, no se tiene prueba estadística de que la hipótesis nula sea verdadera. Esto se debe a que no se establece la probabilidad de aceptar equivocadamente la hipótesis nula para que fuera pequeña.

Para determinar si se puede o no rechazar la hipótesis planteada, se grafica una función de distribución similar a una normal, incluyendo el nivel de significancia, lo que entregará las zonas de rechazo (pintadas en el gráfico). El estadístico de prueba será el que determine si se puede o no rechazar H_0 . Los valores estándar del estadístico de prueba se pueden encontrar en la tabla 25 en la sección Anexos

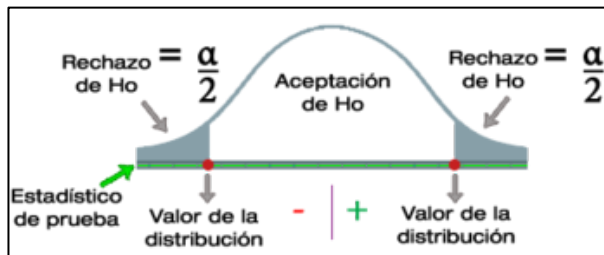


Ilustración 12: Gráfico Estadístico de prueba, Test de hipótesis.

Entre las preguntas que se pueden contestar con una prueba de hipótesis están las siguientes:

- ¿Los CAEX se desplazan a mayor velocidad en turnos día que turnos noche?
- ¿Realmente afecta el material particulado en suspensión en la velocidad de los CAEX?
- ¿Se cumple que los CAEX se muevan a mayores velocidades cuando están descargados?

4 Resultados y Discusión

4.1 Mediciones y Análisis

El procesamiento de los datos entregados por la plataforma del sistema se realizó mediante la herramienta de análisis de datos de *Amazon Machine Learning*, las cuales permiten crear un perfil en función del tiempo para cada medición. Para el caso del material particulado, se creó un perfil en función de la hora del día, considerando los 3 tamaños principales, el cual se puede ver a continuación:

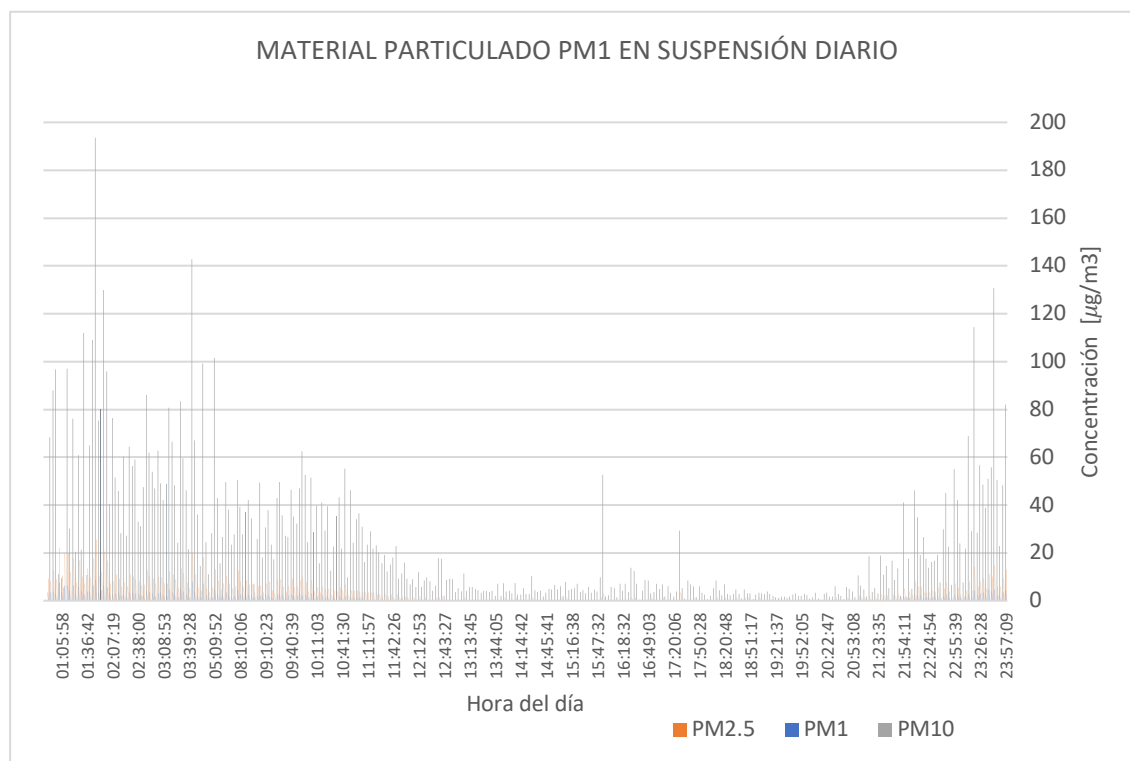


Ilustración 13: Mediciones de material particulado en suspensión en función de la hora del día.

Observando el gráfico anterior, es claro que las concentraciones de PM10 son excesivamente mayores que las de PM2.5 y PM1. Esto se debe a que las mediciones se realizan considerando la masa de polvo en un volumen determinado, y ya que PM10 tiene un mayor volumen a la misma densidad (mismo origen), se tendrá una mayor masa.

Es por esto, que se debe analizar por separado cada tamaño para entender su comportamiento a lo largo del día. A continuación, se muestran los resultados de mediciones de un día promedio para PM1, PM2.5 y PM10, considerando que los valores obtenidos deben considerar distintos máximos para cada tamaño.

A continuación, se muestra un perfil diario de concentración para cada tamaño de material particulado, en función de la hora del día, y considerando distintas escalas de concentración, de manera de ver mejor el perfil de concentración generado.

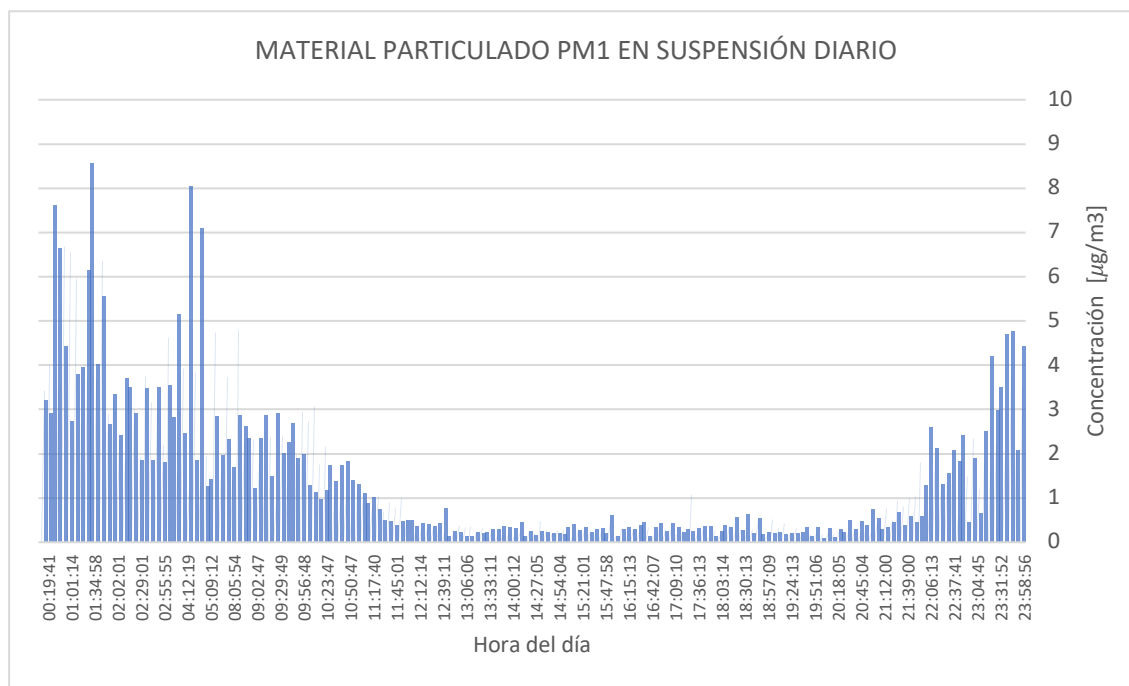


Ilustración 14: Mediciones de PM1 en suspensión en función de la hora del día.

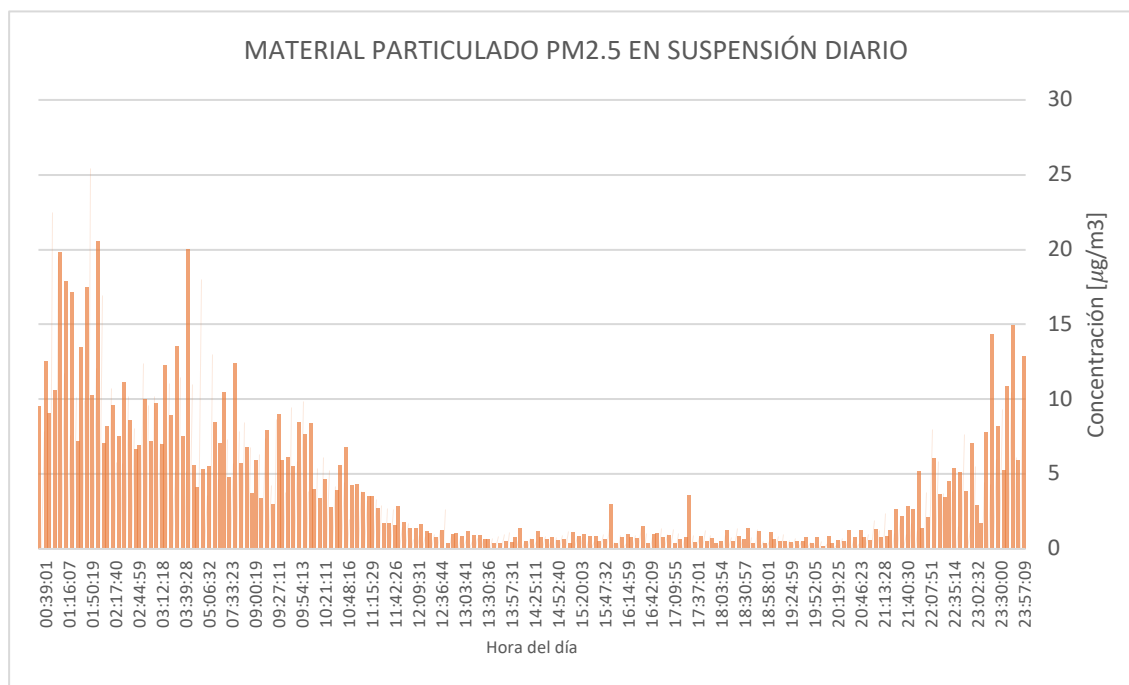


Ilustración 15: Mediciones de PM2.5 en suspensión en función de la hora del día.

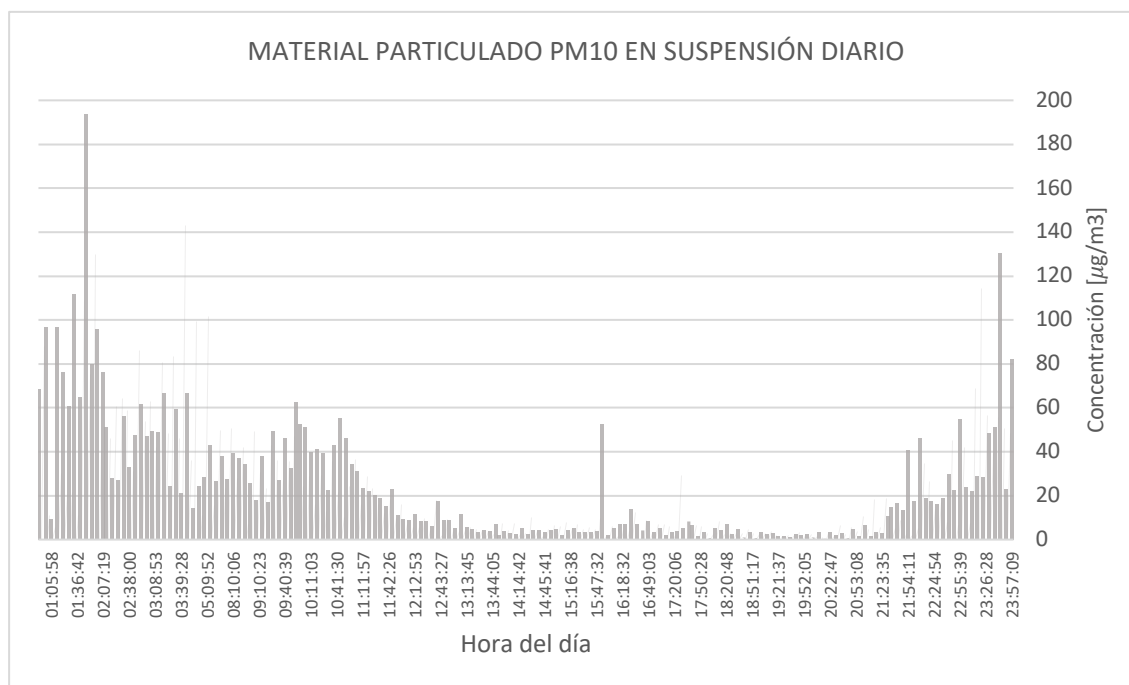


Ilustración 16: Mediciones de PM10 en suspensión en función de la hora del día.

En primer lugar, es importante analizar el cumplimiento de los límites de concentraciones impuestos por los decretos supremos 12, 59 y 594. En primer lugar, el PM10 se mantiene bajo $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ la mayor parte del tiempo, excediéndolo sólo en pequeños momentos, por intervalos de tiempo menores a 1 hora sólo en algunos días, cumpliendo las exigencias impuestas por la ley al considerar un mínimo de 18 horas para el cálculo del promedio. Para el caso del PM2.5, la norma estipula que se deben mantener las concentraciones bajo los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ el 98[%] de los días de un año, lo cual se cumple en un 100[%] en el período medido. De esta manera, Minera Escondida está cumpliendo las normas impuestas por el Ministerio de Medio Ambiente para la presencia de material particulado en suspensión.

De los gráficos anteriores, se puede apreciar una tendencia general: las concentraciones de material particulado en suspensión aumentan durante la noche, desde las 21:00 hrs aproximadamente, alcanzando sus valores máximos alrededor de las 01:00 hrs y alcanzando niveles de equilibrio cerca de las 12:00 hrs.

Lo anterior significa que la operación del turno noche se ve expuesta a niveles mucho mayores de polución, lo que provocará una menor visibilidad del camino para los conductores de camiones o equipos, un mayor desgaste de componentes y lo más grave, una exposición del personal a ambientes de alta concentración de material particulado en suspensión que no ocurre durante el turno día.

Por otro lado, es claro de los gráficos anteriores que las concentraciones de los tres tamaños se comportan de igual manera, dado que la operación minera genera todo tipo de tamaños al

mismo tiempo. Sin embargo, cabe notar que el PM1 logra mantenerse en suspensión más tiempo en comparación con los tamaños más grandes ya que, aunque no alcanza grandes concentraciones, los descensos son menos pronunciados que los de PM2.5 Y PM10. Las concentraciones de PM1 llegan a los mismos niveles que las de PM2.5 durante la tarde, siendo que este último alcanza niveles mucho mayores en la noche.

En los gráficos se pueden ver ciertos saltos en las mediciones, lo que significa que en algún momento, el sensor detectó grandes concentraciones de material particulado en suspensión que no se sostienen con el tiempo, es decir concentraciones que duran 1-2 segundos. Este comportamiento es netamente efecto del Movimiento Browniano, que logra mover grandes nubes de polvo muy concentradas junto a nubes pequeñas y de baja concentración.

Para poder entender el comportamiento del material particulado a lo largo del día se deben considerar las condiciones medio ambientales también, por lo que se debe analizar el comportamiento de temperatura y humedad relativa en un día representativo en Minera Escondida. En primer lugar, se tiene el perfil diario de temperatura:

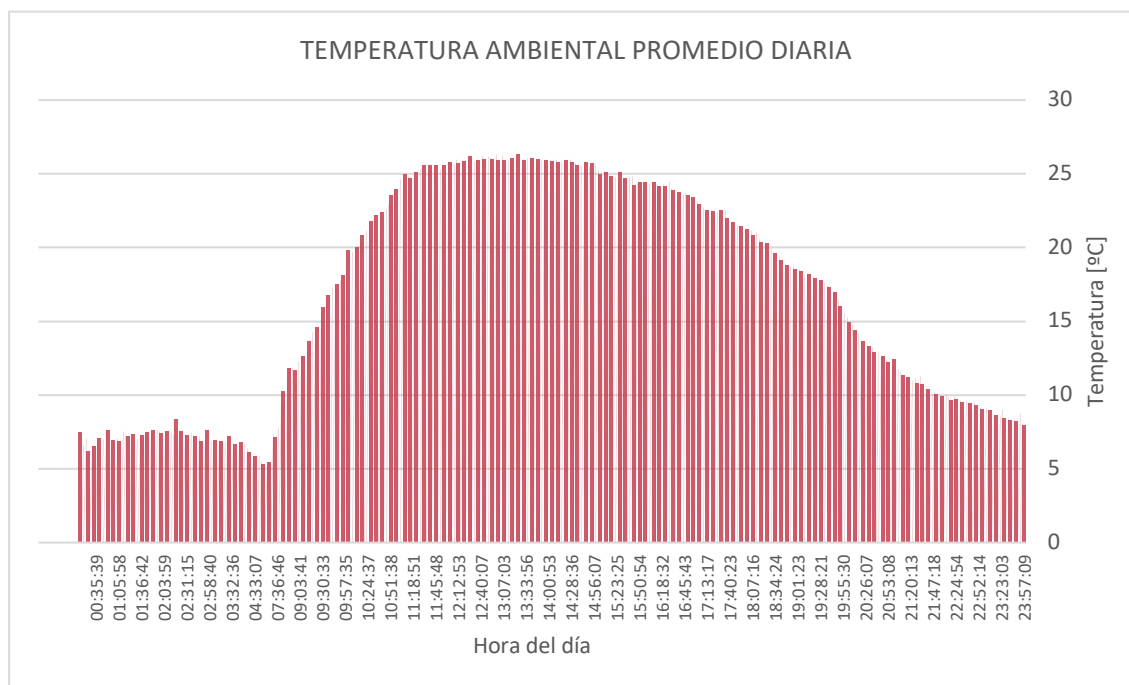


Ilustración 17: Mediciones de la temperatura ambiental en función de la hora del día.

Del gráfico anterior podemos notar que la temperatura comienza a disminuir rápidamente cerca de las 21:00 horas cada día, al igual que el aumento en la concentración de polvo en el ambiente. Durante la noche la temperatura se mantiene relativamente estable sobre los 5°C hasta cerca de las 08:00 horas, momento en el que se tiene una baja repentina de temperatura debido al movimiento de capas de aire de distinta temperatura en la atmósfera del rajo. La capa intermedia de menor temperatura desciende al nivel del sensor antes de comenzar a calentarse por los rayos del sol y su reflejo en el rajo. Se observa claramente que las mediciones de temperatura muestran sintonía con el fenómeno de inversión térmica, disminuyendo nuevamente, y llegando a su nivel más bajo, justo antes de comenzar a aumentar.

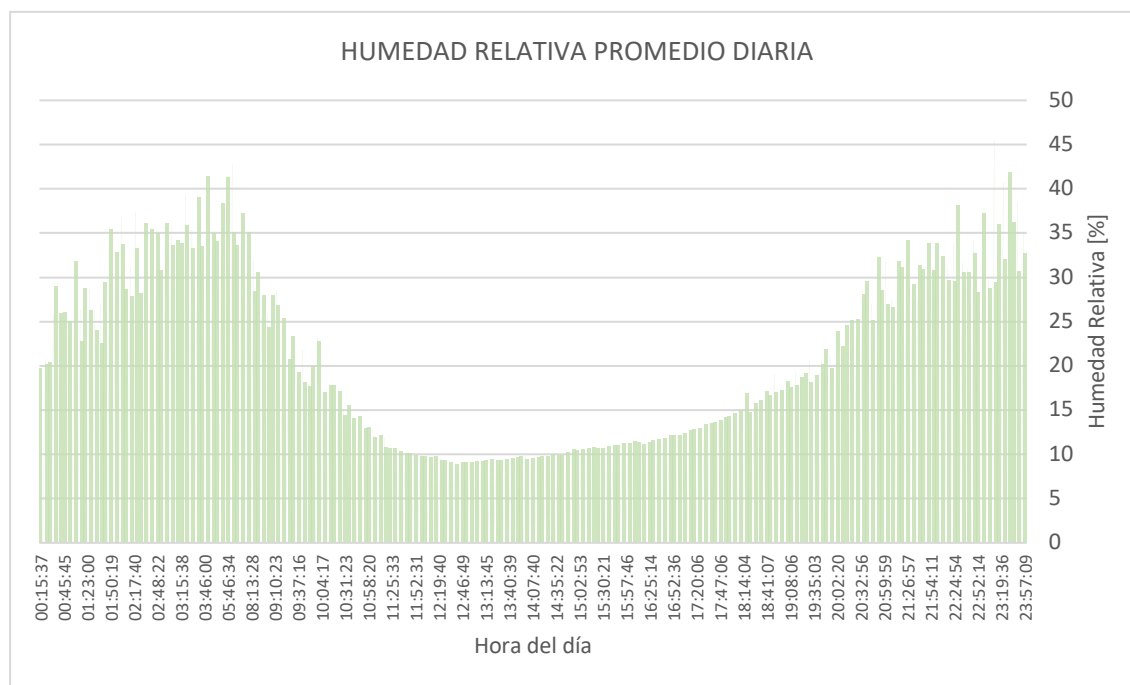


Ilustración 18: Mediciones de la humedad relativa en función de la hora del día.

Las mediciones de humedad relativa confirman la veracidad de los datos de temperatura, encontrándose grandes aumentos de humedad durante la noche, y bajando sus niveles durante el día.

Dado que la mina opera, en teoría, bajo el mismo régimen de producción durante el día y noche, se tiene que la responsabilidad de creación de material particulado que recae sobre los camiones no debiera verse afectada.

De esta manera, la principal razón de el aumento de concentración de polvo en suspensión durante las horas de la noche y madrugada corresponderá a condiciones ambientales como la temperatura, humedad y el efecto de inversión térmica mencionado anteriormente.

Según los resultados obtenidos, es claro que el movimiento del material particulado en suspensión se relaciona fuertemente con los cambios de temperatura y humedad en el rajo. Ya que, dentro de este, la temperatura se ve gobernada por el fenómeno de inversión térmica, se puede decir que el perfil de concentración de polvo también se verá dominado por el fenómeno.

Constantemente, la operación produce material particulado que queda en suspensión. Este material puede asentarse luego de un período de tiempo, o puede mantenerse suspendido por largos períodos y viajando largas distancias. En el día, la situación normal de capas de aire lleva a que el polvo suspendido pueda ser transportado por corrientes de aire que entran y salen del rajo, que logran retirar el polvo o diseminarlo. Durante las noches de inversión térmica, la capa de aire caliente no permite que la de aire frío inferior escape ni que entren corrientes de viento, por lo que el polvo generado durante esas horas se mantendrá en suspensión con muy poco desplazamiento, durante varias horas.

De esta manera, el turno noche se ve expuesto a niveles mucho más altos de polvo en suspensión, por lo que serán más propensos a accidentes por visibilidad y enfermedades respiratorias.

Además, la operación del turno noche se ve afectada aún más, considerando que ya se tiene baja visibilidad por la oscuridad, una capa de polvo que la reduce genera una mayor necesidad de disminuir la velocidad, por lo que menos camiones llegarán a destino.

Por otro lado, será útil analizar cómo varían las velocidades de los CAEX del turno noche que atraviesan los puntos de monitoreo, entendiendo que dicha variación no será completa responsabilidad del material particulado en suspensión, sino también de la visibilidad, fatiga, concentración y otros factores.

En la siguiente tabla se pueden ver los análisis de las velocidades obtenidas por GPS y facilitadas por Minera Escondida, separados por condición de cargado o descargado y según el turno de operación, día o noche:

Tabla 3: Tabla comparativa de velocidades CAEX según turno y condición de carguío.

TURNO DÍA CAEX CARGADO		TURNO NOCHE CAEX CARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	20,0	Velocidad Media [km/hr]	17,3
Error típico	0,1	Error típico	0,1
Mediana	21,0	Mediana	20,0
Desviación estándar	1,6	Desviación estándar	1,3
Varianza de la muestra	2,7	Varianza de la muestra	1,7
Curtosis	1,4	Curtosis	1,3
Coefficiente de asimetría	-0,4	Coefficiente de asimetría	-0,2
Máximo	44,0	Máximo	41,0
Nivel de confianza(95,0%)	0,1	Nivel de confianza(95,0%)	0,2
TURNO DIA CAEX DESCARGADO		TURNO NOCHE CAEX DESCARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	26,0	Media	22,1
Error típico	0,5	Error típico	0,7
Mediana	26,0	Mediana	24,0
Desviación estándar	1,7	Desviación estándar	1,5
Varianza de la muestra	2,9	Varianza de la muestra	2,3
Curtosis	0,9	Curtosis	0,8
Coefficiente de asimetría	-0,1	Coefficiente de asimetría	-0,4
Máximo	51,0	Máximo	45,0
Nivel de confianza(95,0%)	1,0	Nivel de confianza(95,0%)	1,3

De la tabla anterior, se pueden notar varios comportamientos:

1. Tanto para los viajes cargado y descargado, de noche se alcanzan velocidades menores. En promedio, los operarios del turno día conducen un 15,6[%] más rápido que los del turno noche para los viajes cargados, y un 17,6[%] para los viajes descargados.
2. Como es de esperarse, los viajes cargados son más lentos que los cargados, esto sirve como validación de consistencia de los datos.
3. Las desviaciones estándar, y por ende las varianzas de las muestras, son relativamente bajas. Esto demuestra que las simulaciones fueron exitosas y han logrado mejorar la representatividad de las muestras.
4. Para todos los casos, el coeficiente de asimetría es menor a cero, lo que significa que existen más mediciones bajo la media que sobre ella. Esto indica que se tienen menos mediciones sobre la media, pero son más separadas de ella.
5. Las curtosis de los datos dan una idea de la cantidad de muestras cercanas al peak de la distribución y lejanas a las colas. A medida que este coeficiente aumenta, mayor será la concentración de datos al medio de la curva y lejos de las colas, mientras más cercano a cero, más parecida a una distribución normal será. De esta manera, al tener valores de curtosis mayores a cero, se tendrán distribuciones parecidas a la normal e incluso con pendientes más pronunciadas hacia el peak, en ciertos casos.
6. Las mediciones tienen un nivel de confianza mayor en casos de camión descargado que en cargado. Esto se debe a que se tienen considerablemente menos mediciones de CAEX descargados atravesando la zona de análisis. Lo anterior se fundamenta con los circuitos de transporte de material de Minera Escondida, donde no todos los equipos vuelven a ser cargados por la misma pala, sino que, al depositar la carga en la etapa de chancado, generalmente se les asigna un nuevo destino que maximiza la productividad de la operación y la utilización tanto de equipos como de recursos.

Luego de realizar el análisis de la comparación entre turnos noche y día, es claro que de noche el circuito es más lento, lo que puede deberse tanto a la reducción de visibilidad por oscuridad o por presencia de MPS. De todas maneras, se recomienda realizar una prueba de hipótesis para probar que las velocidades de día son mayores que las de noche:

Para realizar la prueba mencionada se debe plantear una hipótesis nula y una alternativa:

$$\begin{aligned}H_0: V_{\text{día}} &\leq V_{\text{noche}} \\H_1: V_{\text{día}} &> V_{\text{noche}}\end{aligned}$$

Ecuación 1: Hipótesis de comparación de medias turno día vs turno noche.

Se plantea un nivel de significancia del 5[%], lo que implica que se está dispuesto a aceptar un error máximo de dicho porcentaje para dar como válida la hipótesis planteada, de manera que se tiene $\alpha=0.05$. Según las hipótesis planteadas y el nivel de significancia escogida, se tendrá un $Z_{\text{crítico}} = +1.64$ (también conocido como región de rechazo). Así se tendrá un gráfico de aceptación de hipótesis como el que sigue



Ilustración 19: Región de aceptación y rechazo para H_1 de tipo mayor que.

De esta manera, se debe resolver la siguiente ecuación, tanto para el caso de CAEX cargado (día vs noche) y CAEX descargado:

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Ecuación 2: Prueba Z de diferencia de medias.

Donde Z corresponde al intervalo de aceptación, \bar{X}_i corresponde a la media de la muestra i , σ_i representa la desviación estándar de la muestra i , y n_i la cantidad de datos de la muestra i . Luego para el caso planteado se tiene:

$$Z = \frac{(20,0 - 17,3)}{\sqrt{\frac{1,6^2}{4.893} + \frac{1,3^2}{4.439}}} = +89,8$$

Ecuación 3: Prueba Z de comparación turno día vs noche, CAEX cargados.

De manera de tener mayor respaldo de la aseveración, se realizará el mismo ejercicio con las estadísticas obtenidas para los momentos en que el CAEX está descargado:

$$Z = \frac{(26,0 - 22,1)}{\sqrt{\frac{1,7^2}{2.197} + \frac{1,5^2}{2.308}}} = +81,5$$

Ecuación 4: Prueba Z de comparación turno día vs noche, CAEX descargados.

De esta manera, se tienen valores de Z mucho mayor al crítico, lo que significa que se rechaza H_0 , y se acepta que la velocidad de los CAEX durante el día es mayor que durante la noche, tanto para el caso de CAEX cargados como descargados. Luego, dado que esto no entrega conclusiones reales sobre la presencia de material particulado en suspensión, se hace necesario aplicar lo observado en las mediciones que sí lo incluyen, para analizar las velocidades en los horarios donde alcanza los mayores y menores valores.

A continuación, se presenta un resumen del análisis estadístico de los datos de velocidad para horarios con baja presencia de polvo y alta presencia de polvo, también distinguiendo viajes cargados de descargados. Los períodos de bajo MPS corresponden a una combinación de los turnos, iniciando a las 20:00 horas hasta las 11:00 horas del siguiente día. De esta manera, se podrán ver variaciones de comportamiento que no se deban a la oscuridad de la noche.

Tabla 4: Tabla comparativa de velocidades CAEX según concentración de Material Particulado en Suspensión (MPS).

BAJO MPS CAEX CARGADO		ALTO MPS CAEX CARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	20,1	Velocidad Media [km/hr]	17,6
Error típico	0,1	Error típico	0,1
Mediana	22,0	Mediana	20,0
Desviación estándar	1,6	Desviación estándar	1,4
Varianza de la muestra	2,6	Varianza de la muestra	1,9
Curtosis	0,5	Curtosis	0,4
Coefficiente de asimetría	-0,1	Coefficiente de asimetría	-0,2
Máximo	43,0	Máximo	44,0
Nivel de confianza(95,0%)	1,2	Nivel de confianza(95,0%)	1,3
BAJO MPS CAEX DESCARGADO		ALTO MPS CAEX DESCARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	22,8	Velocidad Media [km/hr]	18,8
Error típico	0,2	Error típico	0,1
Mediana	22,0	Mediana	22,0
Desviación estándar	1,4	Desviación estándar	1,6
Varianza de la muestra	1,9	Varianza de la muestra	2,7
Curtosis	-0,9	Curtosis	-1,3
Coefficiente de asimetría	-0,1	Coefficiente de asimetría	-0,3
Máximo	51,0	Máximo	45,0
Nivel de confianza(95,0%)	1,5	Nivel de confianza(95,0%)	1,4

Estos resultados presentan ciertas tendencias en la relación Concentración de Material Particulado en Suspensión versus Velocidades CAEX:

1. Para viajes cargados, se puede ver un aumento de velocidad de un 19[%] cuando se tiene baja presencia de MP en suspensión. Para el caso de viajes descargados, se observa un aumento de velocidad más de un 21[%].
2. Nuevamente, se tienen coeficientes de asimetría ligeramente menores a cero, por lo que existen más datos menores a la media que por sobre ella, aunque sea en baja proporción
3. Las velocidades máximas se mantienen estables en ambos análisis y los datos más altos se encuentran en turnos días y en horarios de bajas cantidades de polvo en suspensión.

4. Como es de esperarse, tanto el error típico de la muestra como el nivel de confianza, serán mayores para los viajes sin carga de material, ya que se tienen menos datos. Sin embargo,

Nuevamente se realizará una prueba de hipótesis para las siguientes aseveraciones:

$$H_0: V_{\text{bajo MPS}} \leq V_{\text{alto MPS}}$$

$$H_1: V_{\text{bajo MPS}} > V_{\text{alto MPS}}$$

Ecuación 5: Hipótesis de comparación de velocidades medias con alto MPS y bajo MPS.

Se utilizarán los mismos valores de significancia que los casos anteriores y, por ende, de $Z_{\text{crítico}}$.

De esta manera, para el caso de CAEX cargado se tiene:

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{(20,1 - 17,6)}{\sqrt{\frac{1,6^2}{4.054} + \frac{1,4^2}{4.219}}} = +75,5$$

Ecuación 6: Prueba Z de comparación bajo MPS vs alto MPS, CAEX cargados.

Por otro lado, el contraste de velocidades media para CAEX descargados queda como sigue:

$$Z = \frac{(22,8 - 18,8)}{\sqrt{\frac{1,4^2}{2.251} + \frac{1,6^2}{2.349}}} = +90,3$$

Ecuación 7: Prueba Z de comparación bajo MPS vs alto MPS, CAEX descargados

Nuevamente se tienen valores muy por sobre el valor crítico de rechazo de H_0 , por lo que se rechaza que la velocidad cuando se tiene bajo MPS sea menor o igual que cuando se tiene alta presencia de polvo.

De esta manera, ya es posible asociar la presencia de MP en suspensión a la disminución de velocidades, aunque no se tiene una evidencia tangible del efecto del polvo en la velocidad de los CAEX. Una forma de ver más directamente el efecto sobre la velocidad sería ver cómo varía la velocidad media dentro del mismo turno, cuando hay alta presencia de polvo en relación a cuando hay bajas concentraciones.

Posteriormente, se analizaron las velocidades del turno día, comparando períodos 08:00 horas a 11:00 horas (polvo en suspensión por inversión térmica), de 11:00 horas a 20:00 horas, que corresponde al período con menos polvo del turno día:

Tabla 5: Tabla comparativa de velocidades CAEX del turno día, según concentración de MPS.

08:00-11:00 hrs CAEX CARGADO		11:00-20:00 hrs CAEX CARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	17,4	Velocidad Media [km/hr]	20,2
Error típico	0,1	Error típico	0,1
Mediana	19,0	Mediana	21,0
Desviación estándar	1,4	Desviación estándar	1,3
Varianza de la muestra	2,0	Varianza de la muestra	1,6
Curtosis	2,0	Curtosis	1,3
Coefficiente de asimetría	-0,3	Coefficiente de asimetría	-0,2
Máximo	44,0	Máximo	43,0
Nivel de confianza(95,0%)	0,3	Nivel de confianza(95,0%)	0,2
08:00-11:00 hrs CAEX DESCARGADO		11:00-20:00 hrs CAEX DESCARGADO	
Velocidad Media [km/hr]	18,5	Velocidad Media [km/hr]	21,9
Error típico	1,0	Error típico	0,6
Mediana	19,0	Mediana	23,0
Desviación estándar	1,2	Desviación estándar	1,1
Varianza de la muestra	1,4	Varianza de la muestra	1,3
Curtosis	1,0	Curtosis	0,7
Coefficiente de asimetría	-0,2	Coefficiente de asimetría	-0,3
Máximo	43,0	Máximo	51,0
Nivel de confianza(95,0%)	2,0	Nivel de confianza(95,0%)	1,1

1. Observando el análisis estadístico, se puede notar que hay un aumento en velocidad de los CAEX cargados de casi un 16[%] desde el período con altos niveles de material particulado en suspensión, al período de bajos niveles. Para el caso de los CAEX descargados, se tiene un aumento de velocidad media de más de un 18[%].
2. Nuevamente se encuentran las diferencias en error típico, desviación estándar y nivel de confianza entre las muestras de CAEX cargado y descargado.
3. De esta manera, se puede ver un efecto más directo de la presencia de MP en suspensión, sobre la velocidad del circuito de CAEX. El turno día y su separación en horarios con altas y bajas concentraciones de polvo entregan el mejor escenario para un análisis consistente y robusto, debido a que el analizar meses de datos de esta manera entrega una confianza mayor a comparar días específicos con altos y bajos niveles de polución.
4. En todos los casos analizados, las velocidades aumentan mínimo en un 15[%] al pasar de una situación con altos niveles de material particulado a una de menor concentración, manteniendo el resto de las condiciones de estudio. Lo que indica que el circuito de transporte funciona, al menos, un 15[%] más lento en presencia de MPS.

5. Lo anterior conlleva a la noción de que una velocidad 15[%] mayor, puede traducirse en un 15[%] más de viajes y, por ende, de material movido.

Nuevamente se someterán las estadísticas a una prueba de hipótesis, de manera de obtener las últimas confirmaciones de que la presencia de material particulado está teniendo cierta responsabilidad en la disminución de las velocidades. En este caso, las hipótesis serán:

$$H_0: V_{08-11 \text{ hrs}} \geq V_{11-20 \text{ hrs}}$$

$$H_1: V_{08-11 \text{ hrs}} < V_{11-20 \text{ hrs}}$$

Ecuación 8: Hipótesis de comparación de velocidades medias 08-11 hrs y 11-20 hrs.

Considerando un mismo nivel de significancia del 5[%], en este caso se tendrá un valor de $Z_{crítico} = -1,64$. Además, se deberá trabajar con un gráfico opuesto al usado en la sección anterior, ya que las hipótesis proponen afirmaciones opuestas en signo:

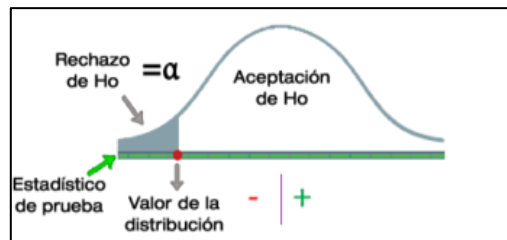


Ilustración 20: Región de aceptación y rechazo para H_1 de tipo menor que.

Para el caso de CAEX cargados, se tiene:

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{(17,4 - 20,2)}{\sqrt{\frac{1,4^2}{1.423} + \frac{1,3^2}{1.762}}} = -57,9$$

Ecuación 9: Prueba Z de comparación 08-11 hrs u 11-20 hrs, CAEX cargados.

Y análogamente para el caso de los CAEX que vienen de descargar el material:

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{(18,5 - 21,9)}{\sqrt{\frac{1,2^2}{1.354} + \frac{1,1^2}{1.632}}} = -80,0$$

Ecuación 10: Prueba Z de comparación 08-11 hrs u 11-20 hrs, CAEX cargados.

De lo anterior, se concluye que la hipótesis que plantea que la velocidad en horarios de alta concentración de polvo en el aire es mayor o igual a la de los horarios en que se tiene bajo contenido de polvo es falsa. Así, tanto para el caso de CAEX cargado como descargado, se concluye que la velocidad en momentos de alto MPS serán menores a las de bajo MPS.

5 Conclusiones

La idea de este trabajo consiste en evaluar críticamente la situación de concentración de material particulado en suspensión en Minera Escondida, de manera de ver cuál es el real efecto de este sobre la seguridad de los trabajadores, el medio ambiente y finalmente, sobre la operación y su eficiencia.

5.1 Recolección de Antecedentes

Este trabajo comienza con la recolección de antecedentes sobre la formación, movimiento y control de material particulado en suspensión, dentro de una mina a rajo abierto. De esta investigación se encontró que existen innumerables acciones en la mina que producen material particulado, siendo una de las principales, la de caminos mineros, en el momento en que los neumáticos del camión pasan por éste, sus partículas se trituran, formando diminutas porciones de roca que, por arrastre y saltación, se suspenden en el aire.

Estos pequeños trozos de roca tienen diversos riesgos y complicaciones asociadas, la más preocupante: la salud de trabajadores expuestos. La trituración de roca alcanza tamaños tan diminutos que se asientan en los alvéolos pulmonares, lo que puede llegar a causar Silicosis, enfermedad pulmonar sin cura. Es necesario estar permanentemente tomando acción en el control de polución en el ambiente de trabajo, la seguridad es primero.

Por otro lado, la bibliografía declara fuertemente el efecto negativo sobre el medio ambiente y ecosistema, además de sus efectos negativos sobre la operación. Las nubes de polvo afectan la visibilidad de los conductores, forzándolos a disminuir la velocidad, ralentizando los tiempos de transporte y así, logrando un menor movimiento de material.

5.2 Mediciones

La segunda parte de este trabajo consistió en la medición de los parámetros a estudiar, lo cual fue un éxito. Se pudieron medir sin problemas las concentraciones de material particulado en suspensión, temperatura ambiental y humedad relativa, dentro de otras. Estas obtenciones entregaron grandes tendencias de comportamiento, en las cuales se pudieron ver notoriamente los efectos de la Inversión Térmica y el Movimiento Browniano.

Se encontró que, durante la noche y parte de la mañana, entre las 20:00 hrs y las 11:00 hrs aproximadamente, se tiene un aumento de hasta 10 veces con respecto a los niveles presentes en el día. Lo anterior se debe a que, durante la noche, el polvo producido por toda actividad creadora del mismo no está escapando las capas de aire dentro del rajo, sino que está siendo encerrada por una capa superior de aire caliente que no permite el desplazamiento de esta capa de polvo. Esto significa que los operarios del turno noche están constantemente sometidos a ambientes con mayor polución que los del turno día, por lo que aumentan los escenarios de baja visibilidad en el camino, sin mencionar la oscuridad, se vuelve una operación mas riesgosa.

Las mediciones permitieron conocer el comportamiento del material particulado en Minera Escondida, lo que es de gran utilidad para la creación o la mejora de un plan de supresión de polvo enfocado en bajar los niveles nocturnos de polvo en suspensión.

Los datos de velocidades de camión son muy dispersos un ubicación y tiempo, pero se puede acotar el área de análisis a las cercanías del punto de medición de polvo, lo que entrega un perfil de velocidades alrededor de zonas con material particulado en suspensión.

La red de monitoreo instalada no es lo suficientemente robusta como para poder simular el movimiento físico de las nubes de polvo, esto requerirá una red mucho más extensa en caminos mineros, donde se pueda medir en diversos puntos las concentraciones de polvo, de manera de poder hacer un seguimiento de cómo estas nubes van disminuyendo o aumentando en tamaño y por qué.

5.3 Procesamiento de Datos

Grandes cantidades de datos requieren ser procesadas por sistemas avanzados de manejo de información, sistemas que sean capaces de analizar diferentes variables y encontrar relaciones entre ellas, así como tendencias en el tiempo o con respecto a ciertas variables.

De esta manera los sistemas de Aprendizaje Automático están calificados para realizar la tarea, aunque no sea un programa diseñado para analizar estos datos, sirve para encontrar tendencias y comportamientos. Para el desarrollo de un programa de análisis exhaustivo y comprensivo de estos datos, es necesaria la intervención de un especialista en programación de *Machine Learning*.

La plataforma de Aprendizaje Automático utilizada cuenta con gran capacidad de procesamiento, niveles mucho mayores que los necesarios para este estudio, así como aplicaciones. De todas maneras, el sistema fue exitoso en el análisis de comportamientos y tendencias.

5.4 Resultados

Los resultados del estudio dejan un poco más claro el comportamiento del polvo en una operación minera a rajo abierto que está sometida a Inversión Térmica. Este fenómeno genera que la producción nocturna de material particulado se acumule en la atmósfera hasta que comienzan a aumentar las temperaturas y las capas de aire comienzan a mezclarse, dando paso a una diseminación de las nubes de material particulado en suspensión.

Conforme a lo anterior, el estudio deja claro que el turno noche se ve mucho más expuesto a ambientes de polución que los del turno día, situación que compromete la salud y el bienestar de los trabajadores.

Es necesario atacar esta situación con un buen plan de supresión de polvo con enfoque en la operación nocturna, ya que no sólo entrega un mejor ambiente de trabajo, sino que puede

lograr un aumento en la producción y productividad del turno noche, aprovechando una disminución en las nubes de polvo, pudiendo alcanzar velocidades medias mayores.

El análisis de los datos muestra indicios de un efecto directo del material particulado en suspensión sobre la velocidad de los CAEX, tan significativa que puede estar generando una pérdida de al menos un 9[%] de material transportado y por ende de producción.

6 Recomendaciones

En esta sección se comentarán ciertos aspectos que pueden ser mejorados para el caso de un posible futuro estudio en profundidad del comportamiento de material particulado en suspensión en faenas mineras a rajo abierto.

6.1 Mediciones y estudios

En primer lugar, las mediciones mejorarían notoriamente con la implementación de una red de monitoreo mucho más extensa a lo largo de caminos mineros y zonas en la mina. Esto dará una mejor idea del movimiento en masas del material particulado, y no solo concentraciones puntuales. El caso ideal es contar con una red tan extensa, que logre analizar el trayecto de partículas o masas de ellas durante todo el período que se mantenga suspendida, de manera de ver su comportamiento y el efecto real en la operación.

Un gran ejercicio sería el monitoreo del trayecto completo de un camión en el turno noche, de manera de analizar su comportamiento al pasar por nubes de polvo con respecto a su comportamiento cuando hay buena visibilidad. De esta manera, se podría eliminar la incertidumbre que genera el factor de oscuridad en el turno noche.

Con respecto al procesamiento de los datos, se recomienda fuertemente diseñar un software a medida de *Machine Learning*, que sea capaz de analizar todas las variables estudiadas en este trabajo, pero con una red de monitoreo que pueda cubrir toda la mina o gran parte de ella. Para lo anterior será necesario contratar a un programador de Aprendizaje Automático o incluso es un trabajo digno de una tesis de grado.

6.2 Supresión de Material Particulado en Suspensión

Aunque no se están sobrepasando los límites permitidos de concentración de polvo en suspensión en Minera Escondida, sí se tiene una situación sobre la que se debe actuar: el notorio aumento de concentraciones de material particulado en suspensión durante la noche y en las mañanas.

Para lograr controlar el aumento de concentraciones de polvo en el ambiente existen diversas tecnologías y soluciones innovadoras. Por ejemplo, en el mercado se tienen soluciones que son capaces de disminuir la generación de PM10 en caminos mineros en un 25% y de PM2.5 en un 5[%]. Además, logra disminuir el uso de agua en supresión de material particulado: al rociar la solución supresora de polvo en un área de 100.000 [m²], se pueden estar ahorrando unas 4.000 ton de agua al año. Para evaluar esta opción será necesario comparar el ahorro en consumo de agua versus el costo de aplicar 1 ton de agente supresor cada 4 kilómetros de camino, a USD\$1.000/ton.

Otras opciones para investigar son las de equipos de supresión de polvo, vehículos diseñados para eyectar agua pulverizada a través de un cañón que puede cubrir grandes áreas debido al soplido a presión integrado. Estos equipos alcanzan eficiencias operacionales de hasta 30 veces un rociador ordinario. Esto se debe a que es capaz de inyectar niebla microscópica en

el aire, que tiene una capacidad de adsorción 3 veces mayor a la del rocío común, reduciendo el consumo de agua en un 70%. Estas soluciones especializadas tienen costos de USD\$1.000 a USD\$30.000, dependiendo del modo de operación y el área que se quiere cubrir.

Finalmente, considerando que gran parte del problema que se tiene actualmente se debe al fenómeno de inversión térmica, será sensato investigar opciones de mitigación de dicho fenómeno. En China se ha instalado un sistema de limpieza de aire urbano a base de energía solar, el que funciona con ventiladores que impulsan la capa de aire frío con polvo en suspensión hacia arriba, donde atraviesa filtros que retienen el material particulado y expulsan grandes cantidades de aire limpio. De esta manera, el usuario se beneficia del sistema al poder actuar antes de que comience la inversión térmica, limpiando la capa de aire frío que se asienta. Las pruebas han mostrado una disminución de concentraciones de PM2.5 en un 11-19[%] en áreas de 10 [km²].

La confirmación del aumento de concentración de polvo en suspensión durante la noche mostrada en este trabajo es razón suficiente para tomar acción contra su presencia, de manera de poder mejorar el ambiente laboral de los operadores y lograr mejorar la eficiencia del proceso productivo.

7 Bibliografía

- [1]. ACHS (2014) *Silicosis*.
- [2]. ACHS (2014) *Material Particulado*.
- [3]. Camfil (2013) *PM1- Fine Dust Hazard to Health*.
- [4]. Higuera, P. Oyarzún, R. (2012). *Mineralogía y Química Ambiental*.
- [5]. Higuera, P. Oyarzún, R. Lillo, J. (2011). *Minería Ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación*.
- [6]. Colegio de Ingenieros Civiles de Baja California Sur, A. C. (2010). *Estudio relativo al movimiento de polvo (residuo mina) debido a la acción del viento*.
- [7]. SERNAGEOMIN (2015). *Normativa de Seguridad Minera*.
- [8]. Minera Escondida Ltda. (2014). *Servicio y suministro de supresor de material particulado (MP10)*.
- [9]. BHP Chile (2014). *Informe de Sustentabilidad*.
- [10]. Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2015). *Informe del Estado del Medioambiente*
- [11]. SONAMI (2013). *Guía de operación para la pequeña minería*.
- [12]. Ministerio del Medio Ambiente de Chile (2012). *Decreto supremo n° 12*.
- [13]. Ministerio Secretaría General de La Presidencia de Chile; Comisión Nacional Del Medio Ambiente (2015). *Decreto supremo n° 59*.
- [14]. Ministerio de Salud de Chile (2018). *Decreto supremo n° 594*.
- [15]. Ministerio de Salud de Chile (1978). *Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica*.

8 ANEXOS

8.1 Faena en estudio

La faena donde se realizó el estudio corresponde a Minera Escondida (ME), la compañía minera de cobre con mayor producción en el mundo, operando a 3.100 m.s.n.m. Se encuentra ubicada en la región de Antofagasta, a 176 km de la ciudad de Antofagasta.

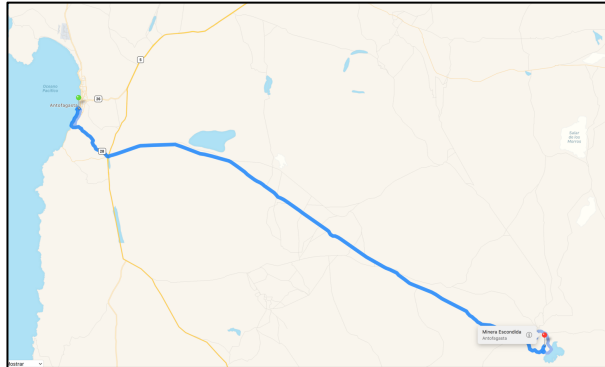


Ilustración 21: Ubicación de faena Minera Escondida.

ME es conocida mundialmente por superar 1.000.000 [ton] de producción anual múltiples veces, más recientemente en el año 2016, pero el año 2017 sufrió una disminución de cerca del 8%, alcanzando 925.439 toneladas métricas, distribuidas en 687.440 [ton] de cobre contenido en concentrados y 237.999 [ton] de cátodos de cobre (COCHILCO, 2018).

Minera Escondida corresponde a una mina a cielo abierto de cobre, que produce concentrado y cátodos de este metal como productos finales. Opera una flota de más de 160 camiones de extracción activos en el año 2018 y 16 palas activas, en promedio para ambos rajes.



Ilustración 22: Vista aérea rajo Escondida.



Ilustración 23: Vista aérea rajo Escondida Norte.

La operación de Minera Escondida consta de:

- Yacimientos *open pit*: Escondida y Escondida Norte
- 2 plantas concentradoras: Laguna Seca y Los Colorados
- Pila Lixiviación Mineral Oxidado
- Pila Biolixiviación Sulfuros Baja Ley
- Planta Electro-Obtención (*electro-winning*)
- Planta de filtros y puerto de Embarque: Coloso

A continuación, se presenta un esquema simplificado del proceso productivo de Minera Escondida, desde los rajes hasta el producto final, separados por el tipo de mineral:

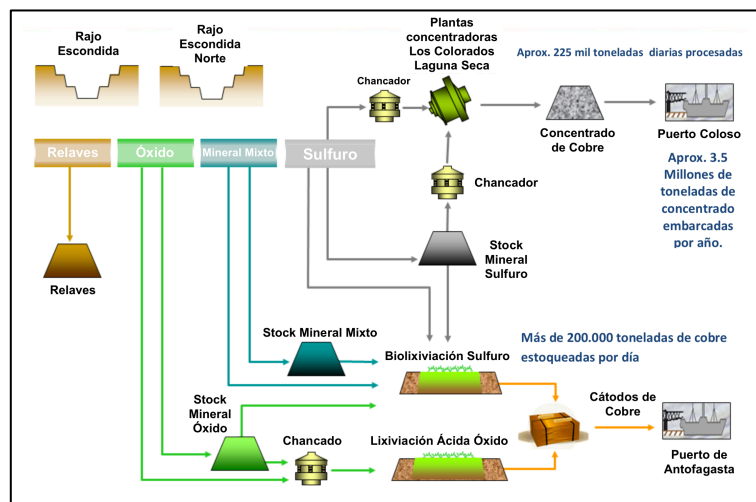


Ilustración 24: Diagrama de proceso productivo de Minera Escondida.

El material extraído de las fases es clasificado como mineral o lastre, según su contenido mineralógico y la ley de corte acordada. La porción de material que contiene bajas leyes minerales será transportada al área de botaderos. El mineral es transportado en los CAEX hacia la etapa de chancado, de donde se obtiene un producto que llegará al área de molienda mediante correas transportadoras. Luego, el material molido y clasificado en mineral sulfurado y oxidado, es llevado a la etapa de procesamiento.

El concentrado de cobre que comercializa BHP en sus oficinas en Santiago de Chile es producto del proceso de flotación de mineral sulfurado. Los cátodos de cobre son obtenidos mediante la lixiviación de mineral oxidado, la biolixiviación de sulfuros de baja ley, SX (extracción por solventes) y EW (electro-obtención).

La operación de minera Escondida se realiza en 2 turnos diarios (día y noche), de 12 horas cada uno, iniciando a las 08:00 horas para el de día, y a las 20:00 horas para el turno noche.

8.2 Valores de Z para pruebas de hipótesis

z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3	0.9987	0.9990	0.9993	0.9995	0.9997	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000

Ilustración 25: Tabla de valores para estadístico de prueba Z.