



SIMULACIÓN DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN UNA EXPLOTACIÓN MINERA E IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Stephani Asprilla Asprilla

Trabajo entregado para la obtención del grado de máster en
tecnología ambiental

Modalidad: Profesional

Septiembre / 2023

Director:
Raúl Arasa Agudo

D. RAUL ARASA AGUDO, Customer Success Director_& Investigador Calidad del Aire, MeteoSim

INFORMA:

Que el trabajo titulado “**Simulación de dispersión de contaminantes en una explotación minera e identificación de medidas de mitigación**” presentado por **D. Stephani Asprilla Asprilla**, con N.I.E.: **Z0112666V**, ha sido realizado bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: “Trabajo profesional”) para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 18 de septiembre de 2023

A handwritten signature in black ink, enclosed in a large, loopy oval shape. The signature appears to read 'Raúl Arasa'.

Fdo.: Raúl Arasa Agudo

RESUMEN

En el siguiente trabajo se calculó y generó un inventario de emisiones, donde se estimaron las tasas y cargas de material particulado menor de 10 μm (PM10) y material particulado menor de 2,5 μm (PM2.5), así mismo se realiza el modelamiento de calidad del aire para simular la dispersión de este tipo de contaminantes generados a partir de las actividades de la etapa de construcción en la mina subterránea Chuquicamata en Calama, Chile. La metodología utilizada para las simulaciones se realizó a través del Software DMScloud de METEOSIM, el cual tuvo en cuenta la zona de desarrollo del proyecto.

Del cálculo de las tasas de emisión se encontró que las siguientes fuentes de emisión corresponden a las de mayor representatividad en la etapa de construcción: calles sin pavimentar, tronaduras construcción obras superficiales, y erosión eólica; y en cuanto a la etapa de operación se encontró las fuentes de emisión con mayor representatividad son: calles sin pavimentar, ventilación y erosión eólica.

La modelación de las fuentes de emisión generó mapas de dispersión de los contaminantes, los cuales mostraron los puntos receptores con mayor influencia de la contaminación atmosférica.

Con el estudio se determinó que la medición de las emisiones de las PM10 y PM2,5, provenientes de la actividad minera subterránea son significativas a pesar de contar con protocolos de prevención como lo son los sistemas de ventilación de extracción de aire viciado. Al igual que se analizó el impacto de la posible aplicación de medidas de mitigación como resultado de una búsqueda del estado del arte de fuentes bibliográficas disponibles actualmente.

Palabras claves: Software Calpuff, calidad del aire, material particulado, dispersión de contaminantes, minería subterránea

ABSTRACT

In the following work an emissions inventory was calculated and generated, where the rates and loads of particulate matter less than 10 μm (PM10) and particulate matter less than 2,5 μm (PM2,5) were estimated, as well as the air quality modeling to simulate the dispersion of this type of pollutants generated from the activities of construction of the subway mine Chuquicamata in Calama, Chile. The methodology used for the simulations was carried out through METEOSIM's DMScloud Software, which took into account the project development area.

From the calculation of emission rates it was found that the following emission sources correspond to the most representative in the construction stage: unpaved roads, blasting, construction of surface works, and wind erosion; and as for the operation stage it was found that the emission sources with the highest representativeness are: unpaved roads, ventilation and wind erosion.

The modeling of the emission sources generated pollutant dispersion maps, which showed the receptor points with the greatest influence of atmospheric pollution.

The study determined that the measurement of PM10 and PM2,5 emissions from subway mining activities are significant despite the existence of prevention protocols such as ventilation systems for the extraction of foul air. The impact of the possible application of mitigation measures was also analyzed as a result of a state of the art search of currently available bibliographic sources.

Key words: Calpuff software, air quality, particulate matter, pollutant dispersion, subway mining.

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios, por ejercer su voluntad y permitirme cumplir cada una de mis metas. También quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera directa o indirecta en la realización de este trabajo de fin de máster. Sus apoyos, consejos y ánimos fueron fundamentales para llevar a cabo este proyecto.

Agradezco a mi familia por su amor, paciencia y constante apoyo durante este proceso. Mis padres y hermana, quien a pesar de la distancia siempre estuvieron ahí para mí; mis tíos, por brindarme todo lo que pudieron para hacer realidad este sueño. Su inquebrantable confianza en mí fue una fuente inagotable de motivación.

Mi gratitud se extiende a mis amigos y compañeros de estudio, quienes compartieron conocimientos, experiencias y momentos valiosos a lo largo de esta travesía académica.

Por último y no menos importante, deseo expresar mi profundo agradecimiento a Raúl Arasa, por su guía experta y dedicación a lo largo de este trabajo de grado, por ser tan chévere conmigo y estar siempre dispuesto a resolver cada duda o inquietud. Sus conocimientos, paciencia y compromiso fueron cruciales para la culminación exitosa de este proyecto.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Alcance.....	14
1.2 Conceptos básicos	15
1.3 Normatividad chilena de calidad del aire	16
1.4 Antecedentes generales.....	17
1.4.1 Información general del proyecto.....	17
1.4.2 Localización y área del proyecto	18
1.4.3 Descripción del proceso	20
1.4.4 Descripción meteorológica de la zona de estudio.....	21
1.5 Objetivos	25
1.5.1 Objetivo general.....	25
1.5.2 Objetivos específicos	25
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1 Identificación de las fuentes de contaminación atmosférica en la mina Chuquicamata.....	26
2.2 Cálculo del inventario de emisiones por cada fuente	26
2.3 Simulación de dispersión de contaminante por el modelo calpuff	28
2.4 Identificación de medidas de mitigación	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	31
3.1 Fuentes de emisión del proyecto mina Chuquicamata subterránea....	31
3.2 Inventario de emisiones por cada fuente.....	32
3.2.1 Emisiones en etapa de construcción	32
3.2.2 Emisiones en etapa de operación.....	35
3.4 Simulaciones realizadas con el modelo CALPUFF	39
3.3 Identificación de actividades de mitigación.....	46
4. CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	51
ANEXOS.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Area de estudio de calidad del aire en Zona Saturada PM10 y Zona Latente SO ₂	19
Ilustración 2. zona de saturación de PM10 y zona de latencia de SO ₂	19
Ilustración 3. Diseño de Macro Bloques y Niveles de Explotación	21
Ilustración 4. Identificación de fuentes de emisión mina Chuquicamata.....	32
Ilustración 5. Concentración PM 10 Total en 24h	40
Ilustración 6. Concentración PM 2,5 total en 24 h	41
Ilustración 7. Rosa de vientos.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores de emisión aplicables	27
Tabla 2. Receptores identificados	29
Tabla 3. Fuentes de emisión del proyecto.....	31
Tabla 4. Factores de emisión etapa de construcción	32
Tabla 5. Factor de emisión Calles sin pavimentar en etapa de construcción	33
Tabla 6. Factor de emisión erosión eólica en etapa de construcción	33
Tabla 7. Emisiones de PM 10 y PM 2,5 proyectadas	33
Tabla 8. Factores de emisión calles sin pavimentar en etapa de operación	36
Tabla 9. Factores de emisión erosión eólica en etapa de operación.....	36
Tabla 10. Emisiones de MP 10 y PM 2,5 proyectadas	37
Tabla 11. Concentraciones de partículas PM10 y PM2,5 en los receptores identificados.....	43
Tabla 12. Resumen de medidas de control y mitigación	47

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Precipitaciones (mm/h) estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama.....	22
Gráfica 2. Velocidad del viento (m/s) estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama.....	23
Gráfica 3. Concentraciones de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama.....	24
Gráfica 4. Concentraciones de PM2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama.....	25
Gráfica 5. Distribución PM 10 etapa de construcción	34
Gráfica 6. Distribución PM 2,5 etapa de construcción	35
Gráfica 7. Distribución PM 10 etapa de operación	38
Gráfica 8. Distribución PM 2,5 etapa de operación	39
Gráfica 9. Comportamiento de las concentraciones de partículas PM10 en los receptores identificados.....	45
Gráfica 10. Comportamiento de las concentraciones de partículas PM2,5 en los receptores identificados.....	45

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, los minerales han jugado un papel vital en el desarrollo y evolución de la industria. Estas valiosas sustancias inorgánicas extraídas de la tierra han sido la piedra angular de muchas industrias que han impulsado el progreso tecnológico y mejorado la calidad de vida en la sociedad moderna. Desde la Edad de Piedra hasta la actualidad, los minerales se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción y la metalurgia hasta la electrónica de vanguardia y las energías renovables. Por su parte, el informe “Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition” (Minerales para la acción climática: El uso intensivo de los minerales en la transición hacia la energía limpia) publicado en el año 2020 por el banco mundial, habla sobre temas relacionados con los minerales como el cobre y el molibdeno que se utilizarán en diferentes áreas de producción, mientras que otros materiales como el grafito y el litio serán de gran utilidad en una nueva tecnología que actualmente se encuentra en desarrollo: el almacenamiento de baterías. Sin embargo, mientras se realiza la transición a energías más sostenibles, la minería tradicional, ya sea a cielo abierto o subterránea continúa en su habitual tarea de extracción de minerales.

En cuanto al cobre, este es ampliamente utilizado por sus características en la energía, la electrónica, la energía y la petroquímica, la maquinaria y la metalurgia, el transporte, la industria ligera, las industrias emergentes etc (Beylot et al, 2015). Este mineral tiene una gran variedad de usos en la industria, es cada vez más apetecido y hace que la obtención del mismo vaya en un aumento progresivo, procurando que el reto actual para la minería sea como continuar con su producción con mayor rentabilidad económica.

Para el caso de Chile, la minería es actualmente su principal actividad económica. Genera directamente el 14,6% del PIB, aunque su fuerte efecto multiplicador incrementa a su vez el consumo de bienes y servicios en otros sectores como la construcción, la industria, el transporte, los servicios de comunicación e información y los servicios empresariales (Cardemil, 2023).

Chile para el año 2020, se situó a nivel mundial como el mayor productor de cobre, renio, yodo y nitratos naturales; según los datos estadísticos aportados por la sociedad nacional de minería de Chile, el país produjo 5624,90 toneladas de mercancía de cobre, de las cuales 1618,30 TM corresponden a la entidad Codelco y 40006,60 de TM a empresas privadas durante el 2021. También es un importante productor de molibdeno, un mineral utilizado en la fabricación de aleaciones metálicas y lubricantes. Otros minerales de importancia económica son el litio, utilizado en la fabricación de baterías, y minerales preciosos como la plata y el oro.

La minería en Chile ha experimentado varios desafíos y cambios a lo largo de su historia. En las últimas décadas, ha habido un aumento en la preocupación por el impacto ambiental de la actividad minera y la necesidad de un desarrollo sustentable.

Lo que ha llevado a implementar nuevas estrategias de producción, que estén enfocadas a la reducción de costos y la disminución de la emisión de contaminantes atmosféricos.

La contaminación atmosférica generada por las actividades mineras puede incluir emisiones de gases como dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), así como partículas gruesas (PM₁₀) y finas (PM_{2,5}) y otros compuestos volátiles orgánicos (VOCs). Estos compuestos impactan negativamente en el medio ambiente y la salud humana, debido a que es precursora de múltiples enfermedades a nivel respiratorio, pulmonar y cardíaco.

El principal problema de la minería a rajo abierto radica en la alta generación de material particulado, y cómo a través de la dirección del viento se mueve a distintas zonas alrededor de su punto de emisión; el transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos están influenciados por complejos factores. Las variaciones globales y regionales del clima, las condiciones topográficas locales (Díaz, 2014) generan variaciones, produciendo que en sitios determinados haya acumulación de material particulado y a su vez, sean consideradas zonas saturadas, dado que los niveles de concentración superan los límites establecidos por la normatividad.

El transporte de emisiones al aire se presenta en todas las etapas del ciclo de vida de la mina, pero especialmente durante la exploración, desarrollo, construcción y operación. La minería requiere el transporte de grandes cantidades de materiales; el procesamiento del mineral requiere maquinaria pesada y equipo industrial. Las pilas de basura o los depósitos contienen pequeñas partículas que el viento se lleva fácilmente. Cuando una fuente de contaminación libera contaminantes a la atmósfera, los contaminantes se transportan por el aire, se diluyen y se modifican (física y químicamente) en la atmósfera y finalmente llegan al receptor (Matías, 2021).

La concentración de estas partículas está directamente relacionada con el tamaño de la mina a explotar, Debido a que se extraen grandes cantidades de mineral, es necesario realizar actividades de extracción con mayor frecuencia, a su vez el uso de explosivos para las tronaduras, y posterior retiro de las marinas generadas. El presente trabajo se ha realizado sobre una de las minas más importantes en Chile, Chuquicamata. Considerada como una de las minas con mayor productividad a nivel mundial; la mina Chuquicamata es líder en la extracción de cobre, oro y molibdeno, está ubicada a 15 km al norte de Calama y a 2870 metros de altitud, en la región de Antofagasta, Chile; es considerada la mina más grande e importante del país, actualmente es gestionada por la compañía Codelco.

Según los datos aportados por la compañía Codelco en Chuquicamata, se producen aproximadamente unas 528.377 toneladas de cátodos electrorefinados y electroobtenidos con una pureza de 99,99 por ciento de cobre. También produce unas 10.760 toneladas métricas de contenido fino de molibdeno. Además, se obtienen otros subproductos, como barros anódicos y ácido sulfúrico. Esta mina se encuentra en funcionamiento desde 1910, ha sido fuente de trabajo y de importancia en la economía

chilena debido a su tamaño, sin embargo, con los años ha impactado negativamente en el medio ambiente, debido al tipo de extracción que se realizaba y por tanto el área circundante a la Fundición de Chuquicamata fue declarada zona saturada por Anhídrido Sulfuroso y Material Particulado Respirable mediante el Decreto Supremo N°185 del Ministerio de Minería en 1991. Es de resaltar que una zona saturada es aquella área geográfica en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas.

Chuquicamata se caracterizaba por su explotación a cielo abierto, pero a consecuencia de los elevados costos, el aumento del riesgo en accidentes por la estructura de la mina y adicional, la generación de emisiones al aire, y que se demostró que existe debajo de la estructura geométrica, recursos mineros que abarcan un total de 4.123 millones de toneladas con una ley promedio de 0,71% de cobre y 310 ppm de Molibdeno, que son viables para la explotación subterránea ; teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente, en 2010 se aprueba el proyecto por parte del gobierno chileno, y se empieza la construcción de una mina subterránea que cambiaría totalmente, la manera de trabajo actual en Chuquicamata, y que a su vez reduciría en un 98% la emisión de material particulado.

Sin embargo, las minas subterráneas pueden ser fuentes significativas de emisiones de gases y partículas contaminantes que pueden afectar áreas sensibles o zonas especiales cercanas a la mina. Para comprender y abordar estos impactos, es necesario realizar una evaluación exhaustiva de las emisiones atmosféricas generadas por la operación minera y su efecto en estas zonas especiales. A través de la simulación de la dispersión de contaminantes se puede determinar el curso y movimiento del material particulado propiamente de la mina y su posterior distribución en el espacio, por tanto, en el presente trabajo profesional se determinará la influencia de la inyección a la atmósfera de emisiones atmosféricas generadas por las actividades de construcción y operación del proyecto mina Chuquicamata subterránea.

1.1 Alcance

El modelo de dispersión abarca la zona de producción de la mina Chuquicamata como un área única, incluyendo tajos abiertos e instalaciones subterráneas, e identifica áreas específicas cercanas a la mina que pueden verse afectadas por la contaminación atmosférica. Estas áreas pueden incluir reservas naturales, parques nacionales, áreas protegidas o comunidades cercanas con alta vulnerabilidad. A partir del inventario de emisiones y la determinación de zonas especiales, se utilizan métodos de modelización y análisis de dispersión de la contaminación para evaluar el impacto de la contaminación del aire en este espacio.

1.2 Conceptos básicos

Para Méndez, 2019 la atmósfera se define como la «capa gaseosa que rodea a la superficie terrestre». Pero a su vez, esta definición es imprecisa ya que confunde dos aspectos estrechamente relacionados como son atmósfera y aire. Para una visión más científica Möller, 2010 expone que “La atmósfera es un reservorio natural que contiene un sistema multifásico (sólido, líquido y gas) y multicomponente (nitrógeno, oxígeno, argón y otros minoritarios) denominado aire. De esta forma, el aire es la parte esencial de la atmósfera, cuyo dinamismo está gobernado por la radiación solar gracias a su capacidad de originar gradientes de temperatura, presión y concentración que en última instancia son los responsables del establecimiento de procesos de transporte de masa, energía y momento”. Por tanto, aunque atmósfera y aire son dos conceptos relacionados no corresponden a exactamente lo mismo, sino a elementos distintos.

En cuanto a la contaminación de la atmósfera, esta se refiere a la presencia en la atmósfera de sustancias o formas de energía que conllevan un riesgo significativo o daño para la seguridad, salud de las personas, el entorno y otros recursos. Esto comienza cuando se liberan diversos contaminantes al aire. Una vez en la atmósfera, estos contaminantes pueden permanecer durante un período variable, dependiendo de su reacción química, la influencia de la lluvia en su eliminación y la capacidad del entorno para dispersarlos (Soldevila,2018).

Por otro lado, la organización mundial de la salud, indica que la calidad del aire que inhalamos se ve afectada por las emanaciones de automóviles, la industria, sistemas de calefacción, proyectos de construcción a gran escala y actividades de extracción al aire libre. Además, el humo del tabaco y los combustibles utilizados en entornos interiores también contribuyen a la contaminación del aire.

De las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos se generan las partículas suspendidas en el aire que consisten en una mezcla compleja de partículas en estado sólido y líquido compuestas por un grupo de moléculas de la misma sustancia o de otra distinta. Por lo tanto, dependiendo de la fuente de emisión, estas partículas exhiben una variación en su composición química y en su tamaño. En el caso de las partículas PM₁₀, suelen llegar hasta las regiones más profundas de la garganta. Por otro lado, las PM_{2,5} pueden alcanzar los pequeños sacos de aire en los pulmones, conocidos como alvéolos (Soldevila,2018).

Las partículas suspendidas en el aire comprenden una variedad de elementos, incluyendo trozos de minerales, residuos de la quema de carbón, hollín resultante de la combustión de fuel oil, desechos de origen orgánico, gránulos de polen, esporas, materiales sintéticos, aerosoles de aceites, diminutas gotas de rocío causadas por lluvias ácidas y diversos líquidos. Estos elementos exhiben diversas composiciones químicas y características físicas (Arrieta, 2016).

A través del uso de los modelos de calidad del aire se puede estudiar la dispersión de estos contaminantes contemplando la dirección y velocidad del viento de la zona

donde se realizará la simulación. Los modelos de dispersión atmosférica se presentan como una herramienta valiosa, dado que integran conceptos teóricos relacionados con la dinámica atmosférica. Esto les permite anticipar con un nivel aceptable de certeza cómo se propagarán sustancias contaminantes en la atmósfera durante un período específico en un área local (Holmes et al,2006).

El modelo de dispersión CALPUFF (Arregoces et al, 2018) imita la influencia de las condiciones meteorológicas cambiantes, tanto en términos temporales como espaciales, en la propagación de contaminantes. CALPUFF presenta características que le permiten abordar diversas situaciones en el tiempo y el espacio. Puede manejar tanto fuentes puntuales como fuentes de área en dominios de modelado que abarcan desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros. Además, es capaz de proporcionar estimaciones de concentraciones ambientales en un rango de tiempo que va desde una hora hasta un promedio anual.

El enfoque Lagrangiano del modelo CALPUFF opera basándose en la concepción de emisiones como: nubes, exhalaciones (puffs) o agrupaciones discretas de sustancias. Entre las características sobresalientes del modelo se encuentran su naturaleza no estacionaria, su capacidad para manejar múltiples capas y especies, permitiendo la simulación de los efectos de las condiciones meteorológicas en el transporte, la conversión y la deposición de contaminantes en la atmósfera a lo largo del tiempo y el espacio (Scire et al,2000).

Gracias a estas características, CALPUFF se ha empleado en la evaluación del impacto de fuentes puntuales y lineales en entornos industriales complejos. También ha sido útil en la cuantificación económica de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana. Además, su aplicación se ha extendido a la formulación de políticas ambientales para abordar escenarios futuros relacionados con el cambio climático (Arregoces et al, 2018). La simulación de la concentración de contaminantes desempeña un papel fundamental al proporcionar una estimación de la calidad del aire en áreas industriales. Esta estimación es especialmente relevante en situaciones donde los residentes de la zona podrían enfrentar niveles de contaminantes que representan un riesgo para la salud humana (Manzur et al, 2012).

1.3 Normatividad chilena de calidad del aire

La normatividad chilena sobre medio ambiente contempla la existencia de dos tipos de normas de calidad ambiental: primarias y secundarias. Las normas de calidad primarias, son aquellas normas de calidad ambiental que tienen como objetivo proteger la salud de la población humana dentro del territorio nacional; las normas de calidad secundaria, tienen por objetivo proteger o conservar el medio ambiente o la naturaleza y son de carácter local y no necesariamente nacional.

A continuación, se presentan las normas primarias de calidad del aire en cuanto a material particulado, actualmente vigentes:

1.- Norma de calidad del aire para MP2,5¹ (D.S. N° 12/2010 del Ministerio del Medio Ambiente) la cual establece que para material particulado fino es veinte microgramos por metro cúbico (20 µg/m³), como concentración anual, y cincuenta microgramos por metro cúbico (50 µg/m³), como concentración de 24 horas. Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad del aire para material particulado fino respirable MP2,5, en los siguientes casos:

- a) Cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50 (µg/m³), en cualquier estación monitora calificada como EMRP;
- b) Cuando el promedio tri-anual de las concentraciones anuales sea mayor a 20(µg/m³), en cualquier estación monitora calificada como EMRP.

2.- Norma de calidad del aire para MP10² (D.S. N° 12/2022 del Ministerio del Medio Ambiente) la cual establece que para material particulado respirable MP10 es cincuenta microgramos por metro cúbico normal (50 µg/m³N), como concentración anual, y ciento treinta microgramos por metro cúbico normal (130 µg/m³N), como concentración de 24 horas. Se considerará sobrepasada la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10 como concentración anual, cuando el promedio aritmético de tres años calendarios consecutivos, en cualquier estación monitora calificada como EMRP, sea mayor o igual a 50 µg/m³N.

1.4 Antecedentes generales

1.4.1 Información general del proyecto

En base en la información disponible en el documento de la consultora Knight Piesold, responsables del Informe de Impacto Ambiental del Proyecto Mina Chuquicamata Subterránea (PMCHS), localizado en la División Codelco Norte (DCN), este proyecto experimenta un cambio esencial al modificar su método de extracción, pasando de la superficie al subsuelo en el yacimiento de Chuquicamata. Esta transformación responde a la necesidad urgente de garantizar la continuidad operativa de la mina. Con una duración estimada de aproximadamente 50 años, el proyecto se divide en varias etapas.

La fase inicial, que se extiende desde finales de 2010 hasta 2018, se enfoca en establecer la infraestructura esencial que permitirá comenzar la extracción en el primer nivel subterráneo. En esta etapa se incluye la excavación de túneles, pozos, rampas y chimeneas, así como la instalación de equipos tanto en la superficie como en el

¹ Hace referencia a material particulado por sus siglas en español.

² Hace referencia a material particulado por sus siglas en español.

interior de la mina. Es importante destacar que esta fase se lleva a cabo en un momento en que la operación de extracción a cielo abierto en Chuquicamata comienza a experimentar una disminución en su producción, que se prevé que concluya alrededor de 2022.

A partir de 2019, el PMCHS prevé un aumento constante en la producción durante un período de nueve años, con la meta de alcanzar una producción diaria de 140,000 toneladas. Para 2028, el enfoque se centra en mantener un proceso de desarrollo constante para los niveles subterráneos posteriores, garantizando una producción continua y estable. Este proyecto ambicioso no solo asegura la viabilidad operativa a largo plazo, sino que también representa un logro significativo en la industria minera debido a su envergadura y su compromiso con la innovación y la sostenibilidad.

1.4.2 Localización y área del proyecto

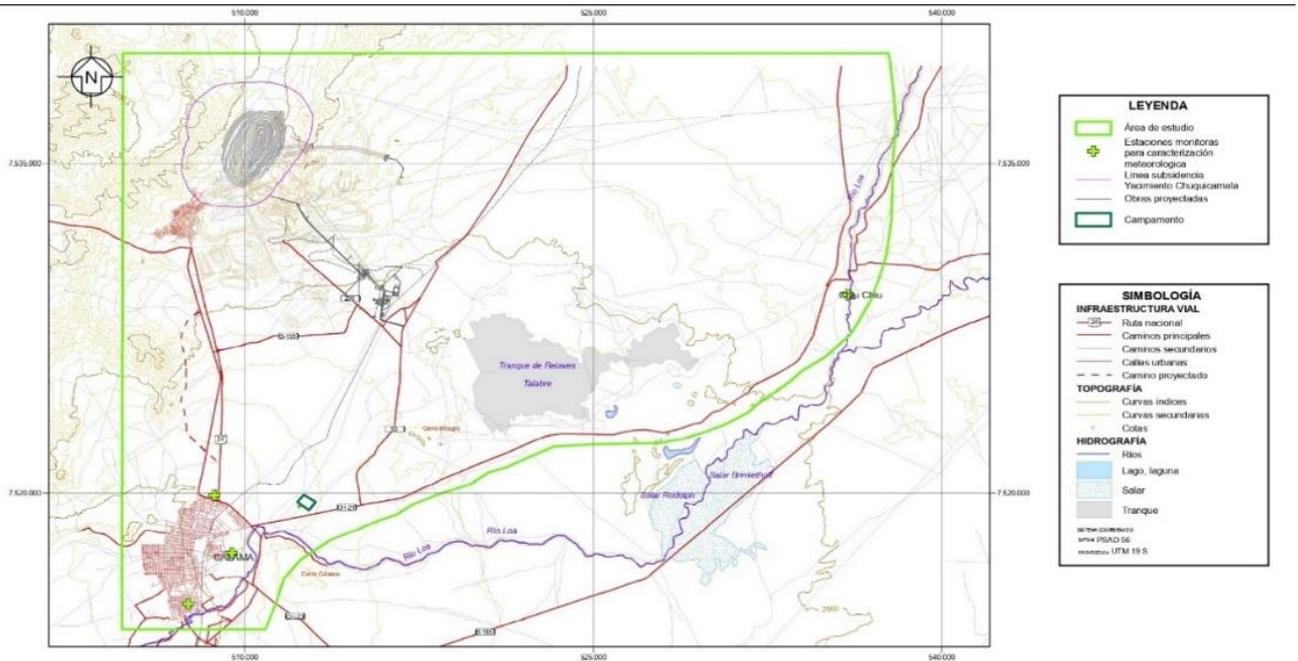
El proyecto de mina Chuquicamata subterránea se localiza en la Región de Antofagasta, Provincia de El Loa, Comuna de Calama. Ubicándose a unos 250 km al Noreste de la ciudad de Antofagasta.

El área de mina subterránea se ubica debajo del tajo existente, aproximadamente a 17 kilómetros al norte. Se encuentra a unos 27 kilómetros al oeste de la ciudad de Calama, ciudad de Chiu Chiu. En cuanto a la infraestructura de superficie se encuentra ubicada aproximadamente a 15 kilómetros de la ciudad de Calama. Dentro de la misma zona también se encuentran otras minas de cobre como Mina Radomiro Tomic (RT), Mina Chuquicamata y la Mina Sur (MS).

Es relevante notar que una parte del Proyecto se encuentra ubicada en una Zona Saturada de PM10 en Chuquicamata, que fue designada por el D.S. N° 185/91 del Ministerio de Minería y es considerada como un área con altos niveles de SO₂, según lo establecido por el D.S. N° 55/05 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia de Chile. Esto implica que se deben cumplir con las regulaciones del Plan de Descontaminación del D.S. N° 206, que requiere que las fuentes de emisión de PM10 compensen sus emisiones en un 120 %.

La ilustración 1 se muestra los límites del área de estudio de calidad del aire, incluyendo la zona de saturación PM10 de Chuquicamata y la zona de latencia de SO₂ y la zona de saturación PM10 de Calama.

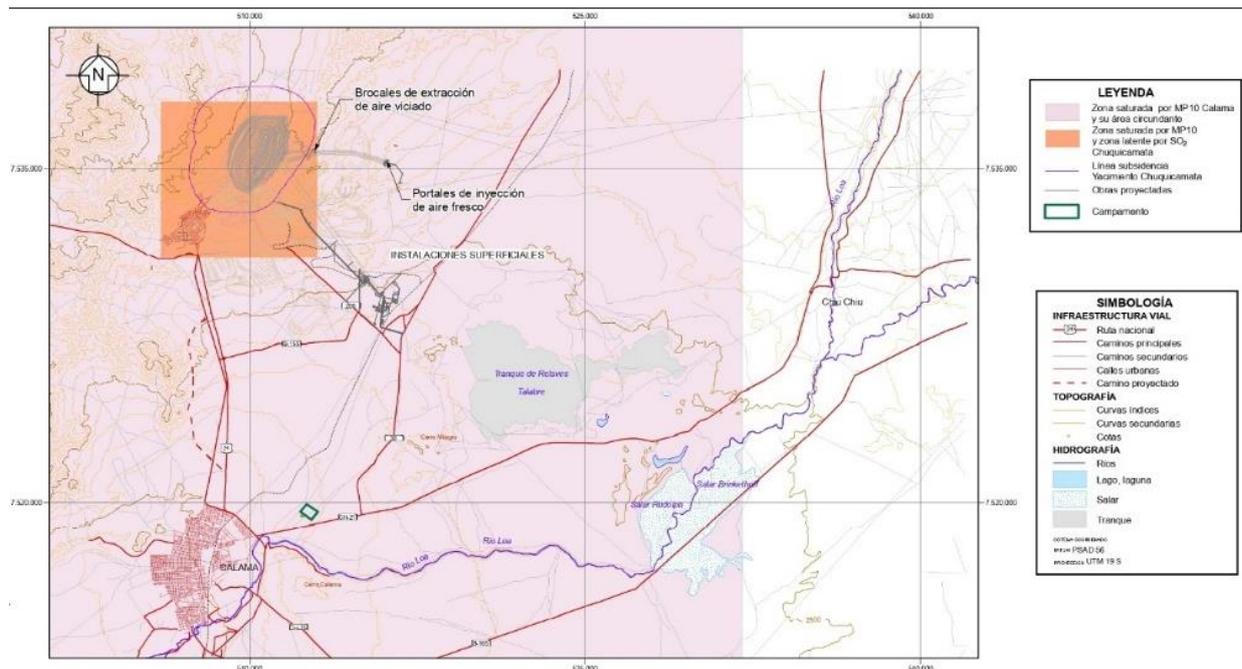
Ilustración 1. Área de estudio de calidad del aire en Zona Saturada PM10 y Zona Latente SO2



Fuente: Knight Piésold Consulting, 2010.

En la Ilustración 2 se muestra que el sitio del proyecto se encuentra ubicado en la zona de saturación de PM10 y zona de latencia de SO₂ en Chuquicamata, la cual corresponde a los pozos de extracción de aire viciado. También se puede ver que todo el proyecto está incluido en la zona de saturación de PM10 en Calama.

Ilustración 2. zona de saturación de PM10 y zona de latencia de SO2



Fuente: Knight Piésold Consulting, 2010.

1.4.3 Descripción del proceso

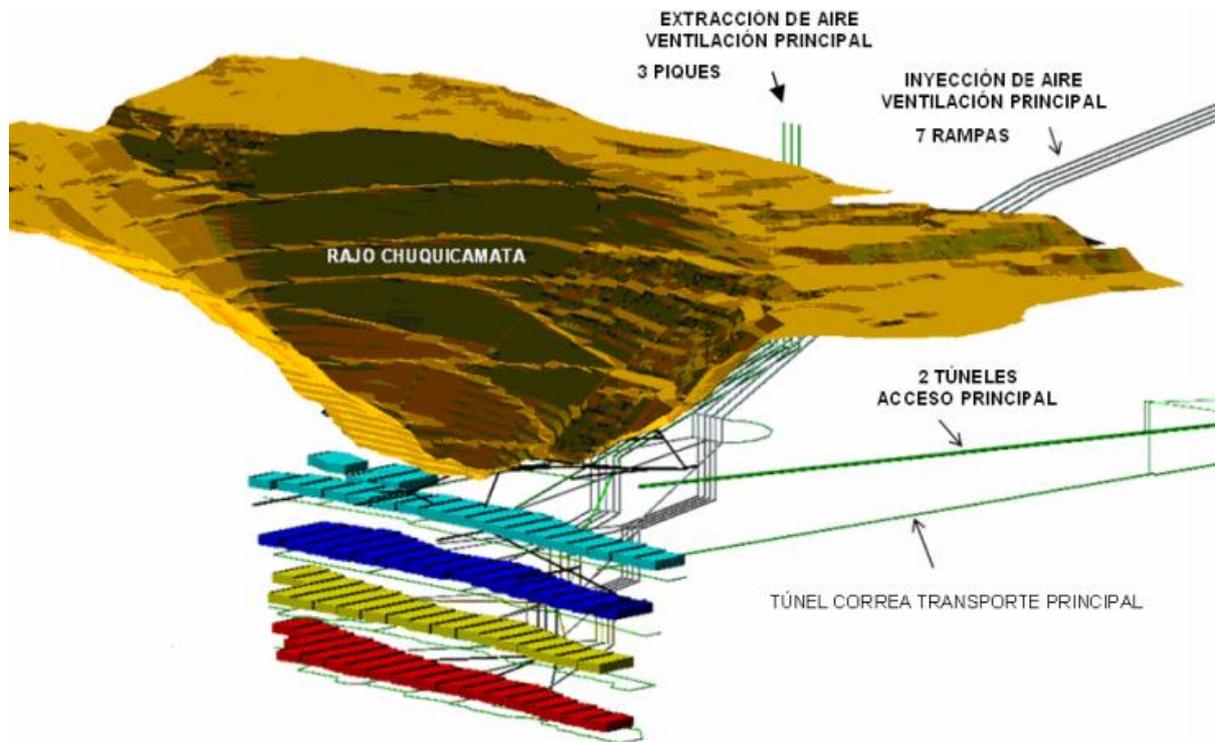
La estrategia minera de Chuquicamata mina subterránea se basa en gran medida en una técnica minera conocida como minería en bloques. Este enfoque crea unidades de desarrollo autónomas llamadas macrobloques que abarcan la preparación y la producción. Estos macrobloques se dividen en cuatro niveles mineros definidos, todos ellos por debajo del nivel del tajo Chuquicamata, que es el actual punto de operación para el cual fue diseñada la mina. La consolidación de estos niveles se realiza paso a paso en una secuencia predeterminada para respaldar la planificación de la producción durante todo el proyecto. La capa superior en el método de la cavidad del bloque se llama capa de hundimiento o capa inferior.

En este nivel se realizan socavados con perforaciones y explosivos para crear el espacio necesario para que los bloques de piedra caigan desde cierta altura. A medida que la roca colapsa, los minerales son impulsados por la gravedad hacia el punto de extracción (ver ilustración 3). Si es necesario, el mineral puede reducirse a su tamaño con equipo especial y cargarse en un cargador para transportarlo a un punto de descarga o pozo de transferencia. Estos pozos mueven el mineral por un camino descendente hasta la estación de trituración en el nivel inferior.

Luego del proceso de procesamiento del mineral, cuando el mineral es triturado, es transportado sobre una cinta transportadora intermedia ubicada debajo de la trituradora, una cinta transportadora por cada macro unidad. Estas correas convergen en el centro horizontal y transportan el mineral a un sistema de dos correas conectadas en serie. a un nivel llamado cinturones horizontales. Estas cintas transportadoras transportan el mineral a un punto central de recolección en la mina. Desde este acopio, el mineral se carga a la cinta transportadora principal, que consta de tres secciones en tándem, mediante alimentadores, y se transporta a la superficie, donde se descarga al acopio.

Desde esta pila de almacenamiento, el mineral se transporta mediante transportadores terrestres a Pila Mina antes de ser transportado a la concentradora DCN para su posterior procesamiento. Este detallado proceso de extracción y procesamiento de minerales demuestra el enfoque cuidadoso y eficiente del Proyecto Minero Subterráneo Chuquicamata para garantizar un proceso de producción continuo y eficiente.

Ilustración 3. Diseño de Macro Bloques y Niveles de Explotación



Fuente: Knight Piésold Consulting, 2010.

Se espera que la primera fase de construcción dure hasta el año 2018, cuando se pondrá en marcha el equipo básico para iniciar la explotación en la primera fase de la mina, tales como: túneles, pozos, rampas y chimeneas, trabajos de superficie e interiores de mina. Esta fase de construcción ocurrió cuando la producción en el tajado Chuquicamata comenzó a disminuir y finalmente cesó las operaciones, lo que finalmente resultó en minería subterránea.

Después de la fase de construcción, se consideró que la operación normal requería nueve años de aumento de la producción y desarrollo de la mina (aumento) comenzando en el año 2019 y terminando en el año 2040 para alcanzar una producción institucional de 140 ktpd. A partir del 2018, la mina mantendrá los siguientes niveles de limpieza continua y producción normal.

1.4.4 Descripción meteorológica de la zona de estudio

El clima representa uno de los elementos más distintivos y relevantes del entorno en las áreas del Norte Grande de Chile. Incluso en las áreas costeras, las estaciones meteorológicas ubicadas en Arica (18 °S), Iquique (19 °S) y Antofagasta (23 °S) registran anualmente precipitaciones que no superan los 3 mm (Sarricolea et al, 2015).

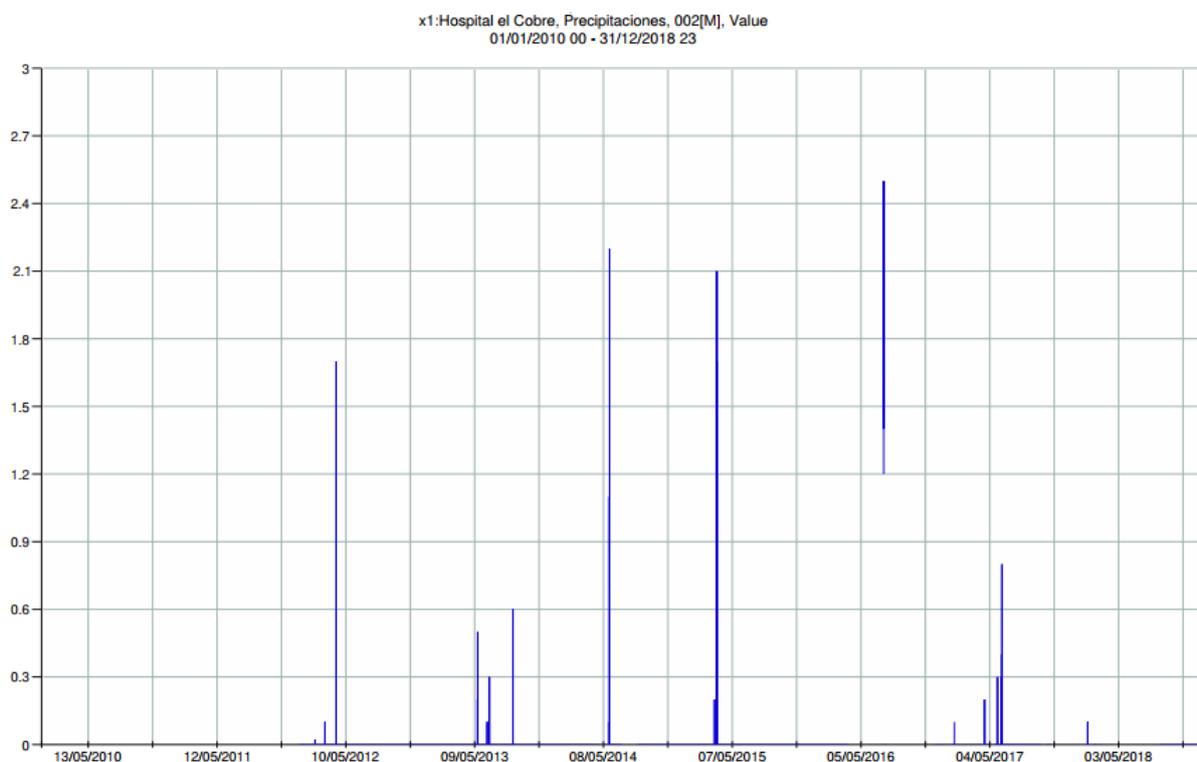
Clima:

Calama se encuentra en la Región de Antofagasta, en el norte de Chile, y está ubicada en el corazón del Desierto de Atacama, considerado uno de los desiertos más áridos

del mundo. Se caracteriza por su extrema aridez y ausencia total de lluvias, lo que resulta en una alta sequedad del aire y cielos despejados con una intensa radiación solar. En Calama, la influencia de los ríos Loa y San Salvador, junto con la presencia de vegetación en el oasis, contribuye a mitigar la sensación de calor, aunque las temperaturas aún son extremadamente altas (Palacios, 2022).

Este tipo de clima coincide con la zona de Chuquicamata, que a su vez se refleja en una aridez extrema donde las precipitaciones son limitadas, como se puede observar en la gráfica 1, que corresponde al año 2010 al 2018, contemplando la etapa de construcción, según los datos de la estación de calidad del aire del Hospital del Cobre, Calama. Las precipitaciones en esta zona oscilan entre 0 y 2,5 mm/h, siendo muy pocos los días en los que ocurren las lluvias.

Gráfica 1. Precipitaciones (mm/h) estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama



Fuente: SINCA, 2023

Por otro lado las temperaturas en Chuquicamata pueden variar significativamente a lo largo del día debido a la falta de nubosidad y la radiación solar intensa. Durante el día, las temperaturas pueden superar los 30°C o incluso llegar a 40°C en los meses más cálidos, mientras que las noches pueden ser muy frías, con temperaturas por debajo de los 10°C (López, 2016).

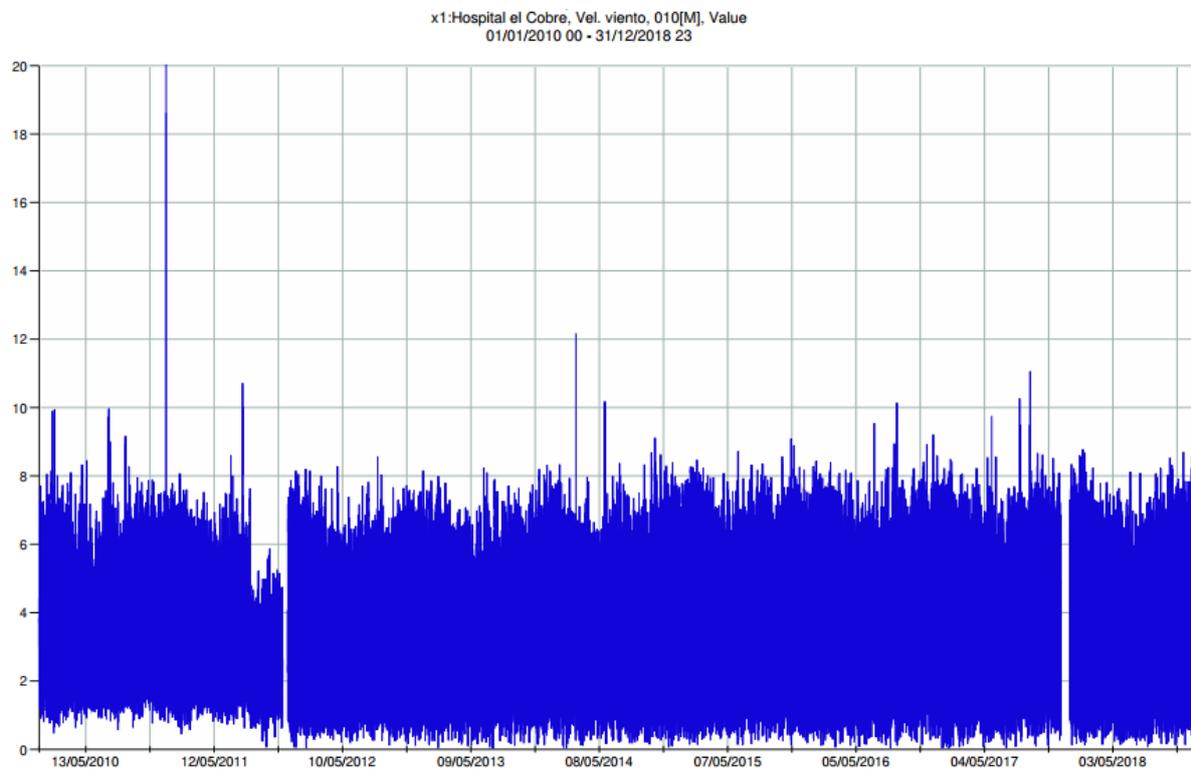
Vientos:

Chuquicamata, se encuentra a una elevación que regularmente supera los 2.800 metros sobre el nivel del mar, este lugar experimenta constantes vientos y ráfagas de gran velocidad y potencia, que soplan sin pausa durante todo el día. Además, se

encuentra en una región geológicamente inestable debido a la actividad sísmica, lo que añade un elemento de riesgo a su entorno. La radiación solar aquí es extremadamente intensa debido a su elevación y a la escasa cobertura nubosa, y se ve aún más intensificada por el efecto de albedo generado por su suelo desprovisto de vegetación (Gutiérrez, 2008).

Ocasionalmente pueden experimentarse vientos más intensos, conocidos como "vientos pampinos" en la gráfica 2, se refleja el comportamiento de la velocidad del viento en los años correspondientes a la etapa de construcción, en promedio se presenta una velocidad del viento de 4 m/s y con máximas de 20 m/s. Estos vientos pueden soplar desde el interior del continente hacia la costa. Estos vientos pueden traer consigo partículas de polvo y arena, reduciendo la visibilidad y creando condiciones adversas.

Gráfica 2. Velocidad del viento (m/s) estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama



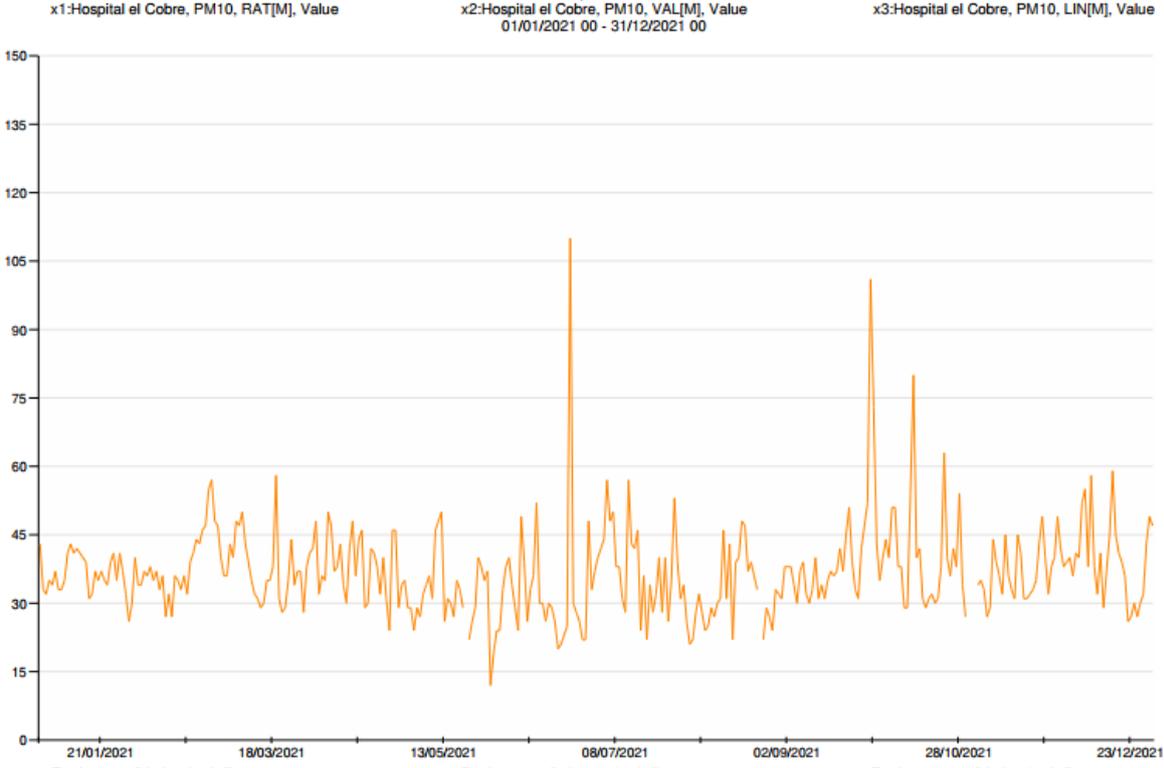
Fuente: SINCA, 2023

La cantidad de polvo que llega a raíz de los vientos desde el oeste es significativamente superior a la que ingresa desde las direcciones sur y este. La razón principal de esto radica en la presencia del oasis en la parte suroriental de Calama y en la capacidad de su vegetación para retener el polvo, funcionando como una especie de barrera natural. En contraste, en las zonas del oeste y suroriental, las comunidades se encuentran directamente expuestas al desierto, sin ningún tipo de filtro, lo que resulta en una exposición constante de la población a las molestias causadas por el polvo suspendido en el aire (Aravena, 2012).

Estas condiciones contribuyen significativamente a que haya un aumento en las concentraciones de material particulado tanto PM10, como PM2,5, sumado a la industria de la zona. Las operaciones mineras llevadas a cabo en Chuquicamata y sus alrededores, así como la fundición de concentrados de cobre, generan emisiones significativas de dióxido de azufre (SO₂) y partículas suspendidas en el aire. Esta área está sujeta a regulaciones establecidas en un Plan de Descontaminación, que establece límites máximos para la emisión de partículas sólidas, arsénico y dióxido de azufre hacia la atmósfera (Instituto de asuntos públicos, 2016).

En las graficas 3 y 4, se observa el comportamiento del material particulado del año 2021, según los datos aportados por la estación de calidad del aire del hospital del Cobre. En cuanto al PM10 se observa una concentración media de 36,9 µg/m³ sin embargo ha alcanzado picos tan altos como 110 µg/m³ principalmente en los meses que corresponde al invierno en la zona del hemisferio sur.

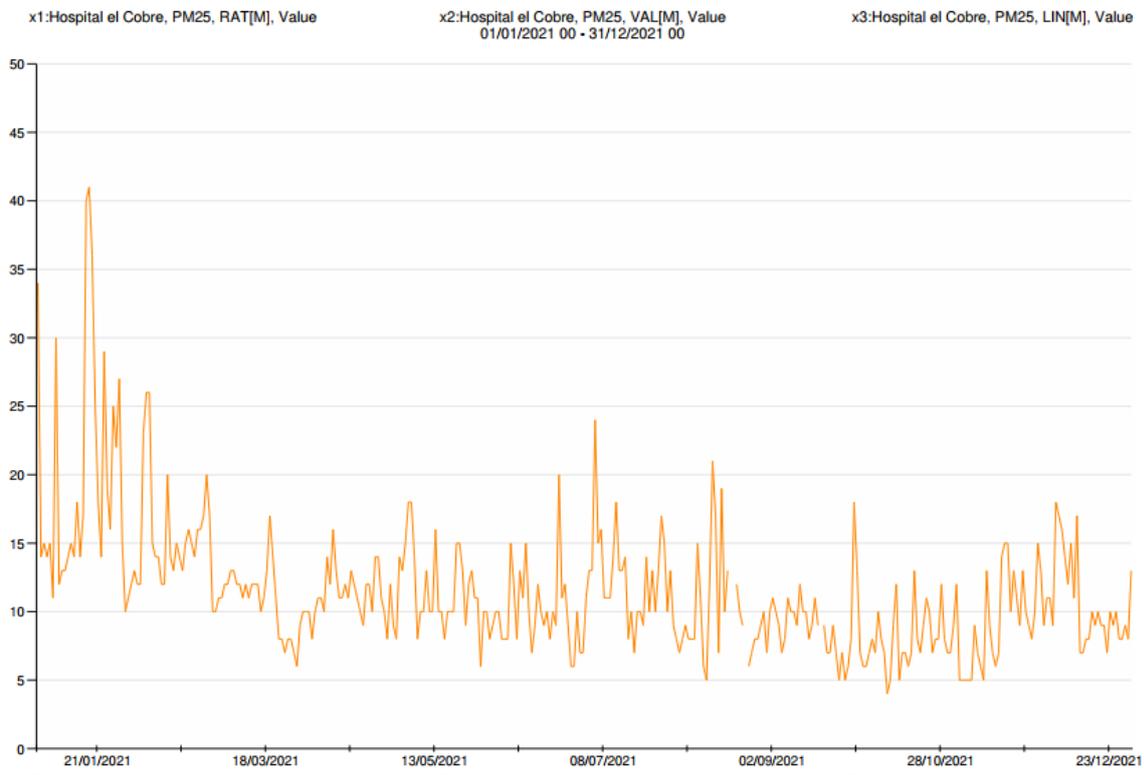
Gráfica 3. Concentraciones de PM10 (µg/m³) en estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama



Fuente: SINCA, 2023

Por otro lado, en la grafica de comportamiento de PM2,5, se puede determinar que durante el mes de enero se presentaron alzas en los niveles de concentración, alcanzado máximas de 41 µg/m³. sin embargo, también coinciden con altas concentraciones en los meses de julio y agosto, esto con un promedio de 11,51 µg/m³.

Gráfica 4. Concentraciones de PM_{2,5} (µg/m³) en estación de calidad del aire Hospital el Cobre, Calama



Fuente: SINCA, 2023

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la dispersión de contaminantes atmosféricos de una explotación minera subterránea en la región de Antofagasta, Chile.

1.5.2 Objetivos específicos

- A. Realizar un inventario de emisiones atmosféricas de una mina subterránea con el fin de evaluar el efecto de la contaminación en zonas especiales cercanas.
- B. Modelar las simulaciones de dispersión de los contaminantes del inventario de emisiones atmosféricas.
- C. Proponer medidas de mitigación de la contaminación por material particulado en la explotación minera subterránea.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de la investigación se realizó mediante el siguiente procedimiento:

2.1 Identificación de las fuentes de contaminación atmosférica en la mina Chuquicamata

Para la identificación de las fuentes de contaminación atmosférica, se basó en las actividades de una mina de cobre subterránea, según lo expuesto en el documento introducción a la minería subterránea de la escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía.

Además, esta información se complementó con lo descrito en la declaración de impacto ambiental proyecto mina Chuquicamata subterránea, sumado a lo aportado por el apéndice A – análisis de los efectos sobre la calidad del aire documentos aportados por la consultora Knight Piesold.

2.2 Cálculo del inventario de emisiones por cada fuente

Se realizaron los cálculos siguiendo lo establecido en la guía metodológica chilena para el inventario de emisiones atmosféricas del SINCA del año 2011 (Escobar et al, 2011). También se hizo uso de lo expuesto en la norma EPA 42, en el apartado 11.9 Western Surface Coal Mining, haciendo uso de la tabla de emission factor equations for uncontrolled open dust sources at western surface coal mines, la cual define los factores de emisión de actividades correspondientes a minas de carbón, sin embargo se hace uso de estos cálculos debido a que en la bibliografía no se han estipulado factores de emisión para minas de este tipo; lo que da lugar a que puedan existir discrepancias entre la realidad y el inventario de emisiones, a consecuencia de la falta de información, sin embargo la norma europea especifica esta situación y establece que se puede hacer uso de los factores de emisión de la minería de carbón para minas de otros tipos de minerales (EMEP/EEA 2019).

Adicional se hizo uso de la guía Inventarios Nacionales de Emisiones a la Atmósfera 1990-2012. Volumen 2: Análisis por Actividades SNAP, específicamente el capítulo 7, que describe el factor de emisiones en transporte por carretera (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, 2014).

A continuación, se describen cada uno de los cálculos matemáticos basados en las normas anteriormente mencionadas, para la estimar las emisiones de material particulado PM10 y PM2,5 de cada actividad generadora tanto en la etapa de construcción como de operación de la mina subterránea.

Tabla 1. Factores de emisión aplicables

Actividad	Definición	Factor de emisión		
		FE	UND	Fuente
Construcción de obras superficiales	Construcción de obras civiles que incluye campamento, oficinas, espacios comunes entre otros.	$E = A * T * FE$	Ton/año	CARB Section 7.7 building Construction Dust, revision 2002
Tubo de escape	Corresponde a las emisiones generadas de los tubos de escape de los vehículos de gran tamaño	$E_c = ec * R$	g/año	Capítulo 7. Transporte por carretera, 2014
Calle sin pavimentar	Transporte de camiones de gran volumen en zonas áridas sin pavimento	$E = e * F * L * (365 - d)$	g/día	Guía metodológica de emisiones atmosférica SINCA, 2011
Marinas	Carga y transporte de marinas (residuos masivos de minería) es decir aquel material sobrante del proceso de extracción	$E = k * \frac{0,0029 * d^{0,7}}{M^{0,3}}$	kg/m ³	EPA 42 11.9 Western Surface Coal Mining
Nivelación	Consiste en el uso de maquinaria para aplanar el terreno	$E = 0,0056 * S^2 * K$	kg/VKT	EPA 42 11.9 Western Surface Coal Mining
Erosión eólica	Movimiento de material particulado por acción del viento desde el acopio de residuos	$E = FE * Am$	kg/día	Guía metodológica de emisiones atmosférica SINCA, 2011

Ventilación	Corresponde al sistema de extracción de aire viciado	$E = C * Caudal$	mg/min	Declaración de impacto ambiental mina Chuquicamata subterránea, 2010
Transferencia de materiales	Movimiento de materia en Correa Overland y Estación de Transferencia	$E = NA * FE$	Ton/año	Guía metodológica de emisiones atmosférica SINCA, 2011
Tronaduras	Fragmentar la roca mediante la detonación controlada de explosivos.	$E = 0,00022 * A^{1,5}$	kg/tronadura	EPA 42 11.9 Western Surface Coal Mining

Fuente: Elaboración propia a partir de varios autores

2.3 Simulación de dispersión de contaminante por el modelo calpuff

El modelo CALPUFF se destaca por su capacidad para abordar tanto fuentes puntuales como fuentes de área en dominios de modelado a lo largo de un extenso período de tiempo. Este modelo altamente versátil y potente está integrado como parte integral del software de dispersión atmosférica DMScloud, que es propiedad y desarrollado por la empresa MeteoSim (disponible en www.meteosim.com).

Para la modelación se tuvo en cuenta los siguientes factores:

- Dominio
- Fecha y duración de la simulación
- Niveles y tipos de fuentes de emisión
- Área y concentración de cada contaminante
- Receptores

Para realizar el modelado, adicional se hizo uso de la herramienta Google Earth para determinar las rutas y polígonos de cada emisión, y a su vez obtener las coordenadas UTM necesarias para introducir los datos en el modelo Calpuff.

Para determinar que la fase de construcción sería la más adecuada para ser simulada utilizando el modelo Calpuff, se consideró que durante este período se generarían las concentraciones más significativas de material. Esto se debe a que durante la etapa de construcción se llevan a cabo diversas actividades, como la construcción de obras en la superficie, la instalación del sistema de ventilación, el tránsito de camiones de

gran capacidad en las calles sin pavimentar y, especialmente, las detonaciones utilizadas para crear niveles de acceso y preparar la instalación de caminos para la siguiente fase de operación.

A su vez, para escoger el año y el mes de simulación, se tomó en consideración la información aportada por la estación de calidad del aire del hospital del Cobre, en cuanto a las concentraciones de material particulado, se concluyó que los meses de invierno, correspondientes a julio y agosto principalmente, representaban altas concentraciones a razón de las condiciones climáticas. Estas bajas temperaturas contribuyen a que la concentración de material particulado sea mayor, ya que, en invierno, las capas de aire caliente tienden a elevarse y atrapar el aire más frío y más denso cerca del suelo. Esto se conoce como inversión térmica. Durante una inversión térmica, los contaminantes pueden quedar atrapados cerca de la superficie en lugar de dispersarse verticalmente, lo que puede llevar a una acumulación de contaminantes y a una mala calidad del aire en áreas urbanas (Dorta, 1996).

En la tabla 2, se encuentra el listado de puntos receptores, los cuales corresponden a estaciones de calidad del aire cercanos a la zona de Chuquicamata, y que en su mayoría se encuentran en la ciudad de Calama, también se han incluido sitios sensibles o vulnerables a la contaminación atmosférica, debido a que son espacios donde frecuentan niños o adultos mayores, quienes, por sus condiciones físicas, se encuentran en mayor riesgo por la exposición a este tipo de contaminantes.

Tabla 2. Receptores identificados

N	RECEPTOR	X UTM	Y UTM	TIPO DE RECEPTOR
1	Club Deportivo 23 de marzo	506399	7516241	Estación de calidad del aire
2	Centro Calama	507389	7516053	Estación de calidad del aire
3	Oasis	508165	7515782	Estación de calidad del aire
4	Hospital el Cobre	509239	7516917	Estación de calidad del aire
5	Colegio Pedro Vergara Keller	506893	7518227	Estación de calidad del aire
6	Colegio Leonardo Davinci	506734,51	7513768,1	Punto vulnerable
7	Colegio ecológico Montessori	506493,43	7514889,5	Punto vulnerable
8	Colegio adventista Calama	507525.75	7515643.50	Punto vulnerable

9	Colegio Chuquicamata	509092.55	7514203.06	Punto vulnerable
10	Colegio Rio Loa	505325.60	7516419.53	Punto vulnerable
11	Centro de salud 1	507434.83	7515639.99	Punto vulnerable
12	Centro de salud 2	507191.66	7514445.41	Punto vulnerable
13	Centro de salud 3	505537.14	7516807.32	Punto vulnerable
14	Centro médico 1	508871.67	7516831.57	Punto vulnerable
15	Centro médico 2	507522.58	7515352.88	Punto vulnerable
16	Hogar de ancianos mi hogar	507233.79	7518635.31	Punto vulnerable
17	Hogar de ancianos san José	507074.10	7517001.64	Punto vulnerable
18	Casa mma	506710.94	7514726.21	Punto vulnerable

2.4 Identificación de medidas de mitigación

Para evaluar el impacto de las medidas de mitigación, se obtuvo información de lo propuesto en el documento de declaración de impacto ambiental mina Chuquicamata subterránea, al igual que lo aportado por fuentes bibliográficas disponibles en bases de datos científicas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Fuentes de emisión del proyecto mina Chuquicamata subterránea

A continuación, se describen las actividades que generan material particulado en la etapa de construcción y operación de la minera en Chuquicamata.

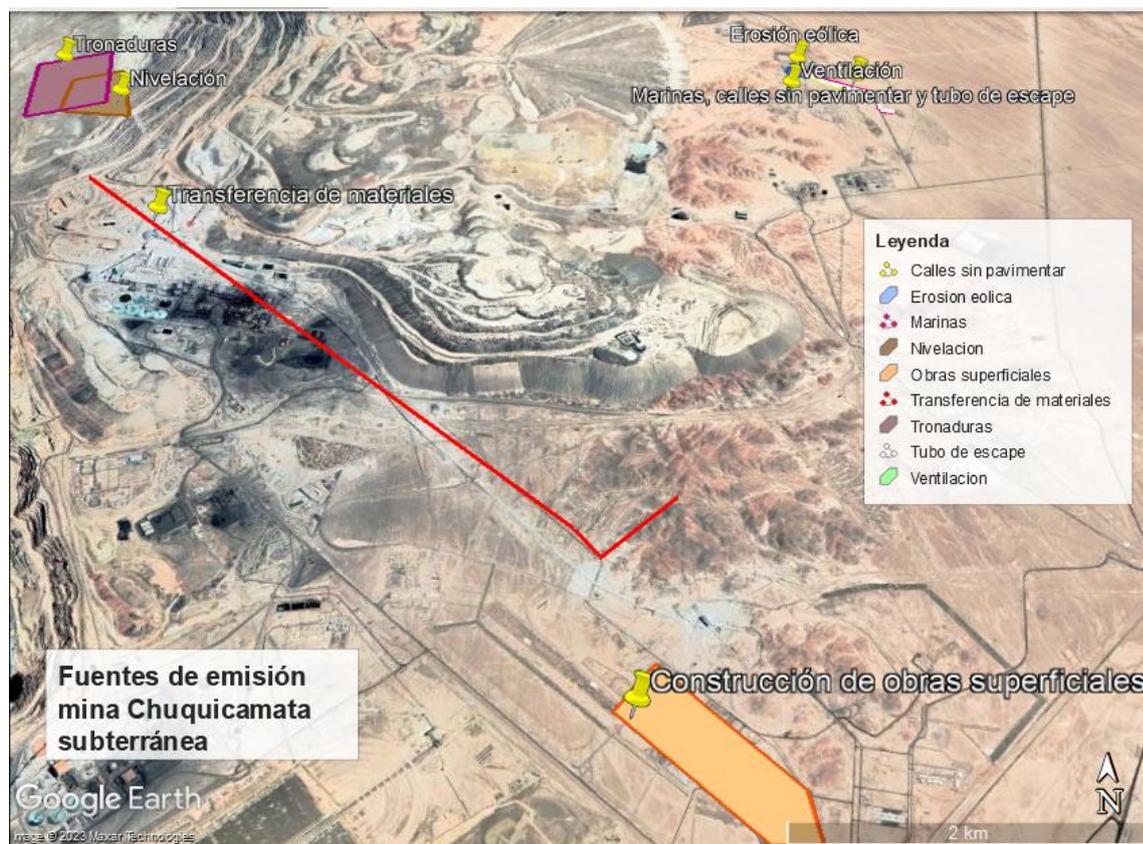
Tabla 3. Fuentes de emisión del proyecto

Actividad Generadora de Material Particulado	Etapa de construcción	Etapa de operación
Carga de Marinas	x	X
Transferencia Material (Stock Pile, Correa Overland, Estación de transferencia y Pila Mina)	x	
Tránsito en Caminos sin Pavimento Transporte de marinas a acopios.	x	x
Erosión eólica de acopios temporales y de botaderos	x	x
Construcción de obras de instalaciones superficiales	x	
Tronaduras requeridas para la construcción de túneles y rampas	x	x
Desgaste del tubo de escape de los vehículos	x	
Nivelación del terreno	x	
Ventilación sistema extracción de aire viciado	x	x

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente ilustración se puede apreciar el mapa con las ubicaciones de las fuentes de emisión.

Ilustración 4. Identificación de fuentes de emisión mina Chuquicamata



Fuente: Elaboración propia mediante la utilización del software Google Earth

3.2 Inventario de emisiones por cada fuente

Los siguientes datos corresponden a los factores de emisión de cada etapa, seguidos de la concentración de contaminantes emitidos por cada fuente, los cuales están expresados en unidades de toneladas. En el anexo A se encuentra el total del inventario de emisiones atmosféricas.

3.2.1 Emisiones en etapa de construcción

Se presentan los factores de emisión en la etapa de construcción en las tablas 4, 5 y 6. En la tabla número 7, se expresan las concentraciones en ton/año de cada fuente de emisión. En cuanto a las gráficas 5 y 6 se pueden observar la distribución de las concentraciones calculadas.

Tabla 4. Factores de emisión etapa de construcción

FUENTES DE EMISIÓN	FACTOR DE EMISIÓN	
	PM 10	PM 2,5
Tronaduras	1681 kg/tronadura	97 kg/tronadura

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Factor de emisión Calles sin pavimentar en etapa de construcción

Año	Factor de emisión vehículos 50 tn		Factor de emisión vehículos 300 tn	
	PM 10 g/vehículo -km	PM 2,5 g/vehículo -km	PM 10 g/vehículo -km	PM 2,5 g/vehículo -km
2010	3,03	0,26	38,39	3,34
2011	0,03	0,00	0,35	0,03
2012	0,03	0,00	0,33	0,03
2013	0,03	0,00	0,37	0,03
2014	0,06	0,01	0,76	0,07
2015	0,06	0,01	0,77	0,07
2016	0,11	0,01	1,44	0,13
2017	0,13	0,01	1,63	0,14
2018	0,85	0,07	10,75	0,94

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Factor de emisión erosión eólica en etapa de construcción

Año	Factor de emisión PM10 kg-día/ha
2010	489,69
2011	314,64
2012	503,76
2013	480,52
2014	560,86
2015	611,13
2016	606,08
2017	576,27
2018	594,83

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7. Emisiones de PM 10 y PM 2,5 proyectadas

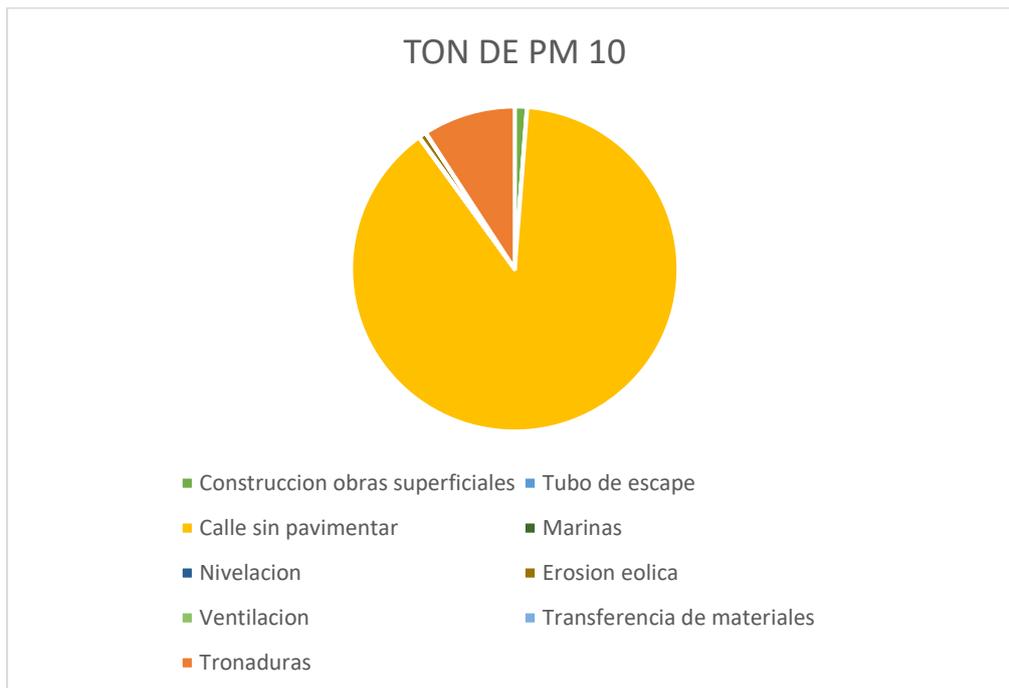
FUENTES DE EMISIÓN	TON DE PM 10	TON DE PM 2,5
Construcción obras superficiales	2637	0
Tubo de escape	84	0
Calle sin pavimentar	197127	17161
Marinas	102	2
Nivelación	29	1
Erosión eólica	1577	237

Ventilación	93	93
Transferencia de materiales	2	0
Tronaduras	20294	1171
Total	221945	18665

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que el total de toneladas producidas en este apartado corresponden al total de 9 años que contempla la etapa de construcción de la mina

Gráfica 5. Distribución PM 10 etapa de construcción



Fuente: Elaboración propia

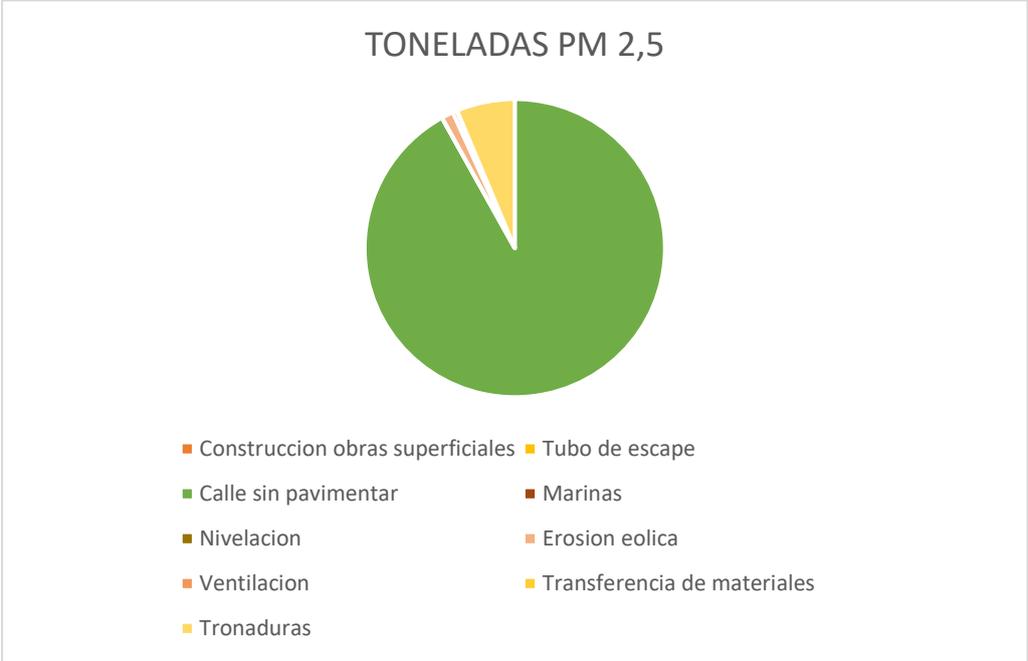
Las principales fuentes de emisión de material particulado PM10 en la etapa de construcción corresponden a las generadas por calles sin pavimentar con una contribución significativamente alta de 197126 toneladas, seguida de construcción de obras superficiales y tronaduras. Estas tres fuentes representan la mayoría de las emisiones sumando un total de 220058 toneladas por el tiempo de construcción, representando aproximadamente el 99% de la tasa de emisión total de PM10.

La actividad de calles sin pavimentar esta directamente relacionada con el transporte de residuos masivos generados a partir de las tronaduras realizadas, es decir que una actividad depende en parte de la otra, al igual que para la construcción de obras civiles, se generan escombros que deben ser reubicados en zonas de acopio temporales, y serán de igual forma transportados por camiones de gran volumen, que al utilizar este tipo de vías sin pavimento, provocan grandes cantidades de polvo que se mueve a través de las corrientes de viento.

Existen otras fuentes menores, como tubo de escape, marinas, erosión eólica, ventilación y transferencia de materiales, que también contribuyen a las emisiones de

PM10, pero su impacto es menor en comparación con las fuentes mencionadas anteriormente. El total de emisiones de PM10 en la zona es de 539,630 toneladas, lo que indica un nivel significativo de contaminación por partículas en el aire.

Gráfica 6. Distribución PM 2,5 etapa de construcción



Fuente: Elaboración propia

Las fuentes más significativas de emisión de material particulado PM2,5 en la etapa de construcción responden a las producidas por las calles sin pavimentar y tronaduras. Estas dos fuentes representan la mayoría de las emisiones totales de PM2.5 con un total de 18332 toneladas que corresponde al 98% de la tasa de emisión total de PM2,5.

A diferencia de las emisiones de PM10, las actividades como construcción de obras superficiales no contribuyen significativamente a las emisiones de PM2,5 en esta zona. Existen otras fuentes menores, como marinas, nivelación, ventilación y transferencia de materiales, que también contribuyen a las emisiones de PM2,5, aunque su impacto es menor en comparación con las fuentes mencionadas anteriormente.

El total de emisiones de PM2.5 en la zona es de 18665 toneladas, cual es menor en comparación con las emisiones de PM10.

3.2.2 Emisiones en etapa de operación

Se presentan los factores de emisión en la etapa de operación en las tablas 8, 9 y 10. En la tabla número 11 se expresan las concentraciones en ton/año de cada fuente de emisión. En cuanto a las gráficas 7 y 8 se pueden observar la distribución de las concentraciones calculadas.

Tabla 8. Factores de emisión calles sin pavimentar en etapa de operación

Año	Factor de emisión vehículos 50 tn		Factor de emisión vehículos 300 tn	
	PM 10 g/vehículo -km	PM 2,5 g/vehículo -km	PM 10 g/vehículo -km	PM 2,5 g/vehículo -km
2019	0,40	0,04	7,65	0,67
2020	0,40	0,03	7,61	0,66
2021	0,31	0,03	5,95	0,52
2022	0,40	0,04	7,65	0,67
2023	0,40	0,04	7,65	0,67
2024	0,40	0,03	7,61	0,66
2025	0	0	0	0
2026	0	0	0	0
2027	1,42	0,12	26,88	2,34
2028	0,40	0,03	7,61	0,66
2029	0,38	0,03	7,22	0,63
2030	0,21	0,02	4,06	0,35
2031	0	0	0	0
2032	0	0	0	0
2033	0	0	0	0
2034	0	0	0	0
2035	0	0	0	0
2036	0	0	0	0
2037	1,42	0,12	26,88	2,34
2038	0,40	0,04	7,65	0,67
2039	0,40	0,04	7,65	0,67
2040	0,40	0,03	7,61	0,66

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Factores de emisión erosión eólica en etapa de operación

Año	Factor de emisión PM10 kg-día/ha
2019	618,64
2020	606,23
2021	536,42
2022	557,81
2023	311,40
2024	6,00
2025	6,00
2026	6,00
2027	6,00

2028	6,00
2029	6,00
2030	6,00
2031	6,00
2032	6,00
2033	6,00
2034	6,00
2035	6,00
2036	6,00
2037	6,00
2038	6,00
2039	6,00
2040	6,00

Fuente: Elaboración propia

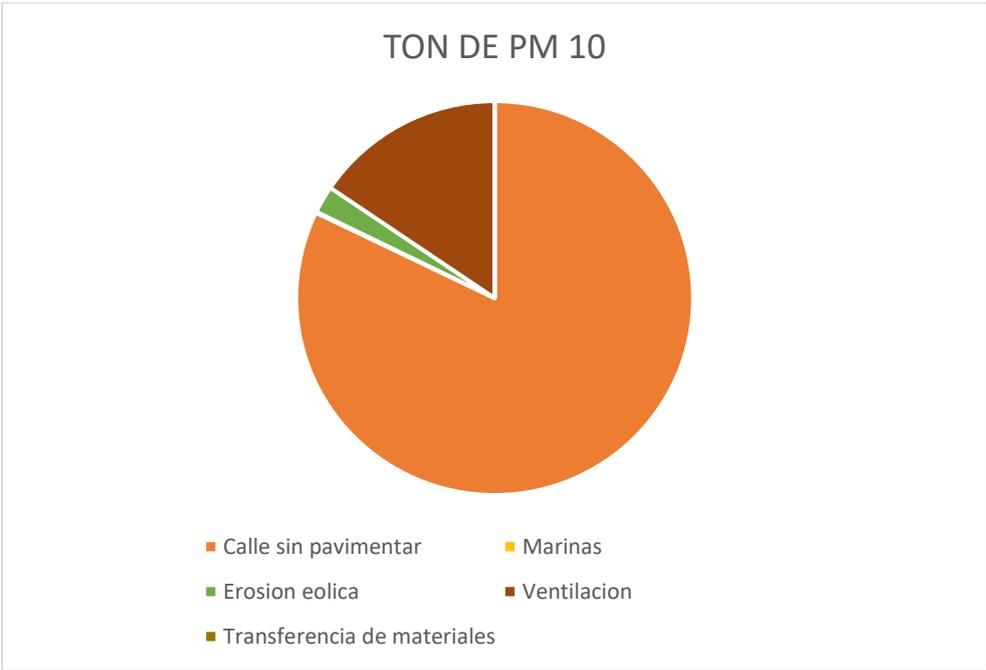
Tabla 10.Emisiones de MP 10 y PM 2,5 proyectadas

FUENTE DE EMISIÓN	TON DE PM 10	TON DE PM 2,5
Calle sin pavimentar	33393	2907
Marinas	37	1
Erosión eólica	910	136
Ventilación	6313	2525
Transferencia de materiales	2	0
Total	40654	9357

Fuente: Elaboración propia

Es importante resaltar que el total de toneladas producidas en este apartado corresponden al total de 40 años que contempla la etapa de operación de la mina. En cuanto a las emisiones generadas por tronaduras en esta etapa no se consideran significativas y, por ende, se hace uso de lo expresado por la consultora Knigth Piesold en la declaración de impacto ambiental, el cual indica que este tipo de emisiones se encuentran contempladas dentro de la concentración de ventilación de aire extraído.

Gráfica 7. Distribución PM 10 etapa de operación



Fuente: Elaboración propia

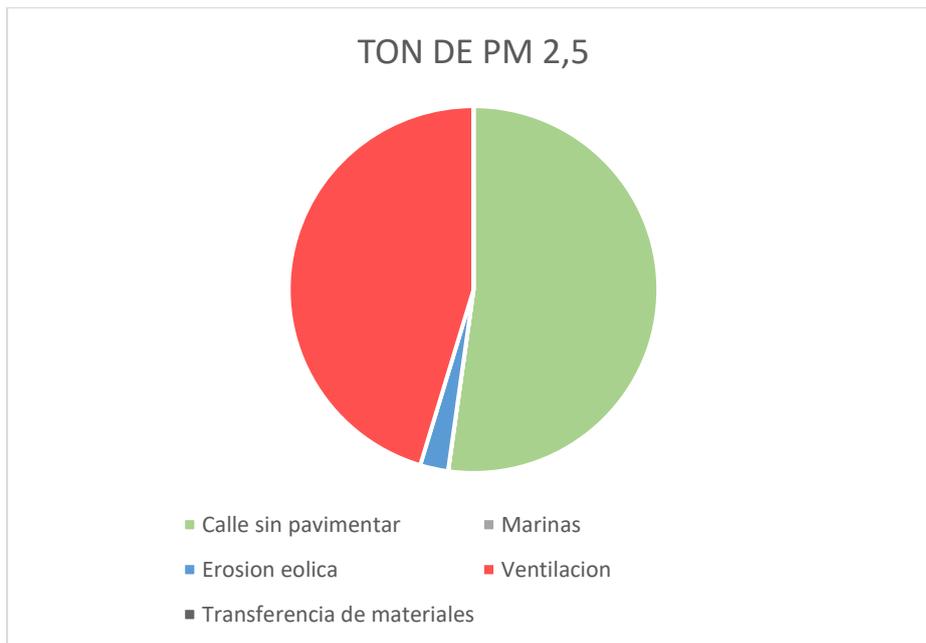
La calle sin pavimentar es la principal fuente de emisión de partículas PM10, contribuyendo con un total de 33393 toneladas.

La erosión eólica contribuye con 910 toneladas de partículas PM10. Aunque es una fuente más pequeña en comparación con la calle sin pavimentar, aún es importante y debe ser considerada, especialmente en áreas con condiciones climáticas propicias para la erosión eólica como lo es Chuquicamata, con los vientos.

Las emisiones de partículas PM10 relacionadas con actividades marinas son comparativamente bajas, representando solo 37 toneladas en total.

La ventilación contribuye con 6,313 toneladas de partículas PM10. Está directamente relacionado con la dispersión de partículas en el aire debido a proceso extraer el aire viciado de la zona subterránea de la mina. La transferencia de materiales parece ser una fuente menor de emisiones de partículas PM10, contribuyendo solo con 2 toneladas. Sin embargo, cualquier fuente de emisión debe ser monitoreada y controlada para mantener una buena calidad del aire.

Gráfica 8. Distribución PM 2,5 etapa de operación



Fuente: Elaboración propia

La principal fuente de emisión de partículas PM_{2.5} en esta área es la calle sin pavimentar, contribuyendo con un total de 2,907 toneladas. La ventilación contribuye con 2525 toneladas de partículas PM_{2.5}, como se mencionó anteriormente en este cálculo se incluyen las emisiones de tronaduras excavaciones, transporte de mineral, movimiento de vehículos y maquinarias, entre otros.

La erosión eólica contribuye con 136 toneladas de partículas PM_{2.5}, aunque su magnitud es menor en comparación con la calle sin pavimentar, sigue siendo un factor importante, especialmente en áreas con condiciones climáticas propicias para la erosión eólica como lo es la zona de Calama, que oscilan entre 5 a 10 m/s como lo muestra la rosa de vientos (ver ilustración 7). En contraste, las emisiones de partículas PM_{2.5} relacionadas con la extracción de marinas son extremadamente bajas, totalizando solo 1 tonelada.

3.4 Simulaciones realizadas con el modelo CALPUFF

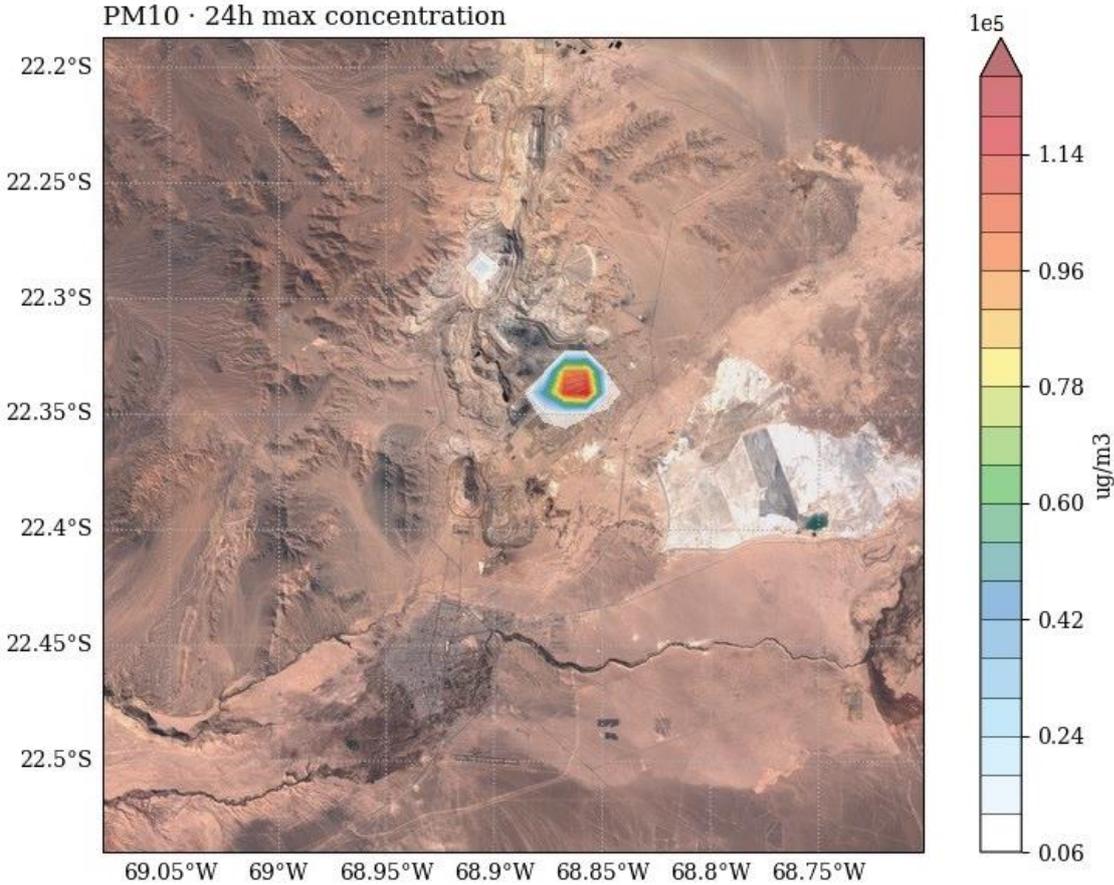
Las propiedades inherentes del modelo CALPUFF permitieron adquirir un entendimiento del proceso de dispersión de los contaminantes en la atmósfera, especialmente del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, que se originan a partir de las actividades que se llevan a cabo en la mina subterránea. Esto se evidencia en las ilustraciones 5 y 6, donde se analiza el comportamiento de cada partícula en conjunto con las condiciones meteorológicas de la región.

Respecto al mapa correspondiente al PM₁₀ (ver ilustración 5), se nota que la mayor concentración se encuentra en la zona sin pavimentar, donde los vehículos de gran tamaño, con capacidades de 50 y 300 toneladas métricas, transportan los desechos

masivos de la minería, es decir las marinas, desde su origen hacia los puntos de almacenamiento designados, más conocidos como las zonas de acopio.

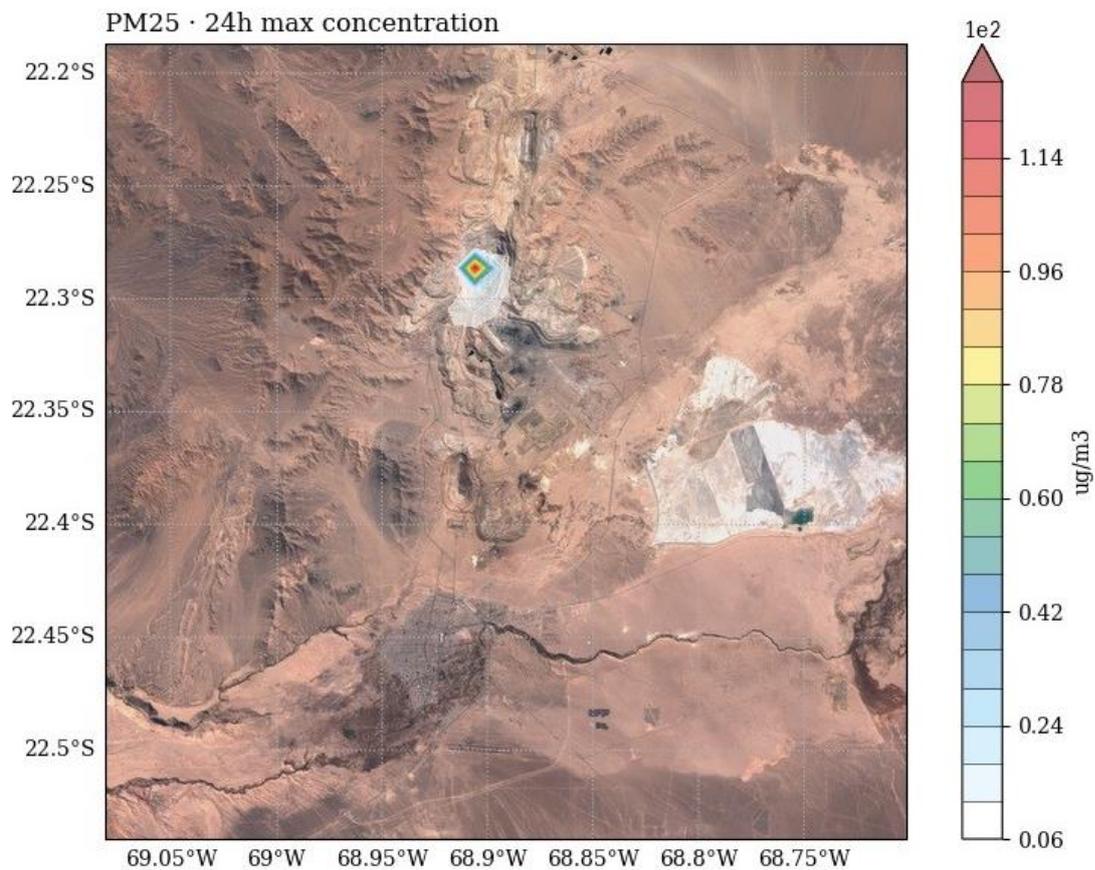
Así mismo, en el mapa correspondiente a la dispersión de PM 2,5 (ver ilustración 6) se aprecia como los contaminantes se concentran cerca del área entre las tronaduras y las calles sin pavimentar. Debido a que el modelo contempla las condiciones meteorológicas es importante resaltar que el mes escogido para la simulación corresponde al de julio, debido a que corresponde a la estación del invierno en la zona sur del planeta y estas temperaturas contribuyen a una mayor concentración de los contaminantes, obteniendo resultados del peor escenario en cuanto a cantidad de material particulado.

Ilustración 5. Concentración PM 10 Total en 24h



Fuente: Meteosim Modelo Calpuff

Ilustración 6. Concentración PM 2,5 total en 24 h



Fuente: Meteosim Modelo Calpuff

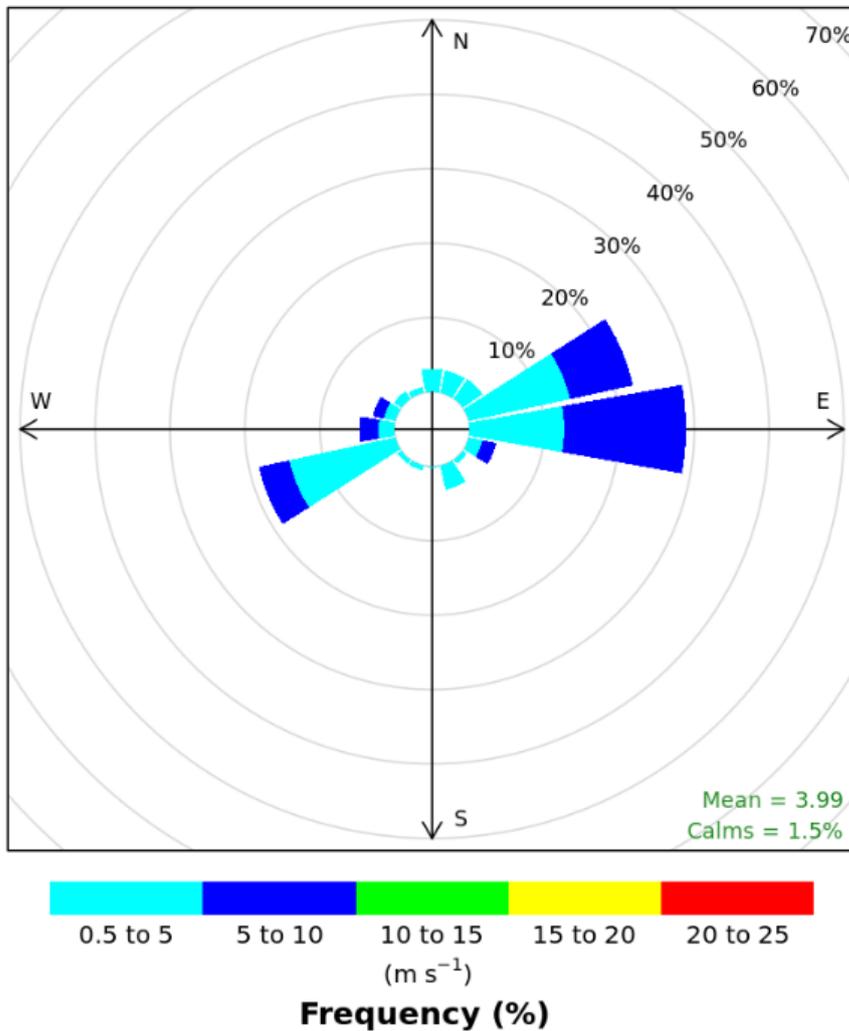
El modelo también genera la rosa de los vientos de la zona de Chuquicamata, esta herramienta permite resumir los datos meteorológicos. Es útil para mostrar cómo varían las condiciones de velocidad y dirección del viento según el año. La presente rosa de vientos (ver ilustración 7) adopta como campo de velocidad de viento el denominado con el encabezado ws, y como dirección de viento el encabezado wd; se puede deducir que la dirección dominante del viento es del este y noreste como segunda dirección predominante con velocidad aproximada que se encuentran dentro del rango de 0,5 a 10 m/s, con una frecuencia que oscila entre 20% a 30%; adicional la rosa de vientos nos indica que el porcentaje de calma es 1,5 % que corresponde al tiempo en el que la velocidad del viento es cero.

A través de la rosa de vientos, también se identificó la variabilidad del viento, a razón de que tiene mayor predominancia a dirigirse a la zona este y noreste, sin embargo, también oscila en una dirección contraria, es decir hacia suroeste, con velocidades que empiezan desde 0,5 m/s a 10 m/s con una probabilidad entre 0 a 20%.

Por otro lado, la velocidad del viento influye en la altura alcanzada por la columna de contaminantes originada por una liberación con impulso vertical y fuerza térmica. En situaciones de vientos suaves, la elevación de la columna es superior en comparación con condiciones de vientos intensos. Además, vientos con baja intensidad resultan en

una dispersión mínima, mientras que vientos de gran fuerza promueven una dispersión significativa (Venegas, et al,2012).

Ilustración 7.Rosa de vientos



Fuente: Meteosim Modelo Calpuff

Según los datos proporcionados por el modelo respecto a las concentraciones de cada receptor identificado (ver tabla 11) como posible punto vulnerable a la contaminación atmosférica a razón de que la población existente o que se encuentra habitualmente en este espacio corresponden a adultos mayores, niños o personas con enfermedades graves, que según lo expuesto por la organización mundial de salud presentan un mayor riesgo a las consecuencias en su salud provocadas por estar en contacto con este tipo de partículas, especialmente las menores a 2,5 que por su pequeño tamaños son capaces de alcanzar directamente a los pulmones al ubicarse en los alveolos de los mismos. Por tanto, es importante destacar que la legislación chilena establece límites para la calidad del aire, con un máximo de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2,5 en un período de 24 horas.

En el caso de PM10, las concentraciones registradas varían significativamente, oscilando entre 70,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 222,71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, en seis receptores se supera el límite legal de 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que sugiere que en relación con PM10, la calidad del aire tiende a ser regular y se deben establecer métodos de prevención y mitigación para encontrarse dentro de los estándares legales emitidos por el gobierno chileno, podemos observar el comportamiento de los datos de los receptores en cuanto a este tamaño de partículas en la gráfica 9.

En cuanto a PM2,5, los valores de concentración también varían, con rangos desde 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 53,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La mayoría de las mediciones de PM2,5 están por debajo del límite legal de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un período de 24 horas establecido por la legislación chilena, lo que indica un cumplimiento generalizado de las normativas. Sin embargo, se registraron dos casos en los que las concentraciones de PM2,5 superaron el límite legal, llegando a 53,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, tal como se puede apreciar en la gráfica 10. Esto podría indicar episodios puntuales de contaminación atmosférica que requieren una atención continua y un monitoreo riguroso para garantizar que se cumplan las regulaciones y se mantenga una calidad del aire adecuada.

Los datos sugieren que en general, las concentraciones de PM10 y PM2,5 se mantienen dentro de los límites legales en Chile, lo que indica una buena calidad del aire en la mayoría de los casos. No obstante, es esencial seguir supervisando y controlando la calidad del aire para prevenir y abordar posibles episodios de contaminación que puedan afectar la salud pública y el medio ambiente.

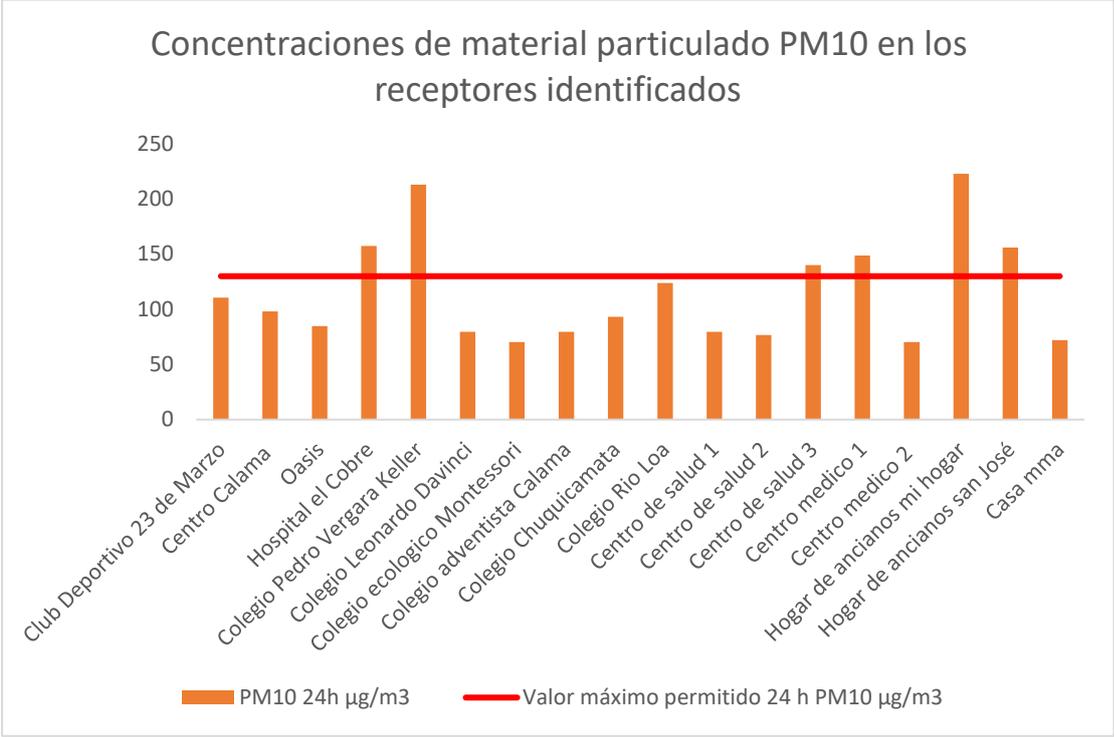
Tabla 11. Concentraciones de partículas PM10 y PM2,5 en los receptores identificados

RECEPTOR	X UTM	Y UTM	PM10 24h $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valor máximo permitido 24 h PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2,5 24h $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Valor máximo permitido 24 h PM2,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Club Deportivo 23 de marzo	506399	7516241	110,50	130	45,19	50
Centro Calama	507389	7516053	98,12	130	39,18	50
Oasis	508165	7515782	84,78	130	0,04	50
Hospital el Cobre	509239	7516917	157,49	130	46,14	50
Colegio Pedro Vergara Keller	506893	7518227	212,93	130	0,07	50
Colegio Leonardo Davinci	506734,5	7513768,14	79,69	130	35,23	50

Colegio ecológico Montessori	506493,4	7514889,45	70,46	130	32,01	50
Colegio adventista Calama	507525.75	7515643.50	79,58	130	0,04	50
Colegio Chuquicamata	509092.55	7514203.06	93,32	130	40,42	50
Colegio Rio Loa	505325.60	7516419.53	123,86	130	49,94	50
Centro de salud 1	507434.83	7515639.99	79,58	130	35,40	50
Centro de salud 2	507191.66	7514445.41	76,80	130	0,03	50
Centro de salud 3	505537.14	7516807.32	140,16	130	53,83	50
Centro médico 1	508871.67	7516831.57	148,68	130	0,05	50
Centro médico 2	507522.58	7515352.88	70,34	130	33,86	50
Hogar de ancianos mi hogar	507233.79	7518635.31	222,71	130	0,07	50
Hogar de ancianos san José	507074.10	7517001.64	155,93	130	53,83	50
Casa mma	506710.94	7514726.21	72,18	130	0,03	50

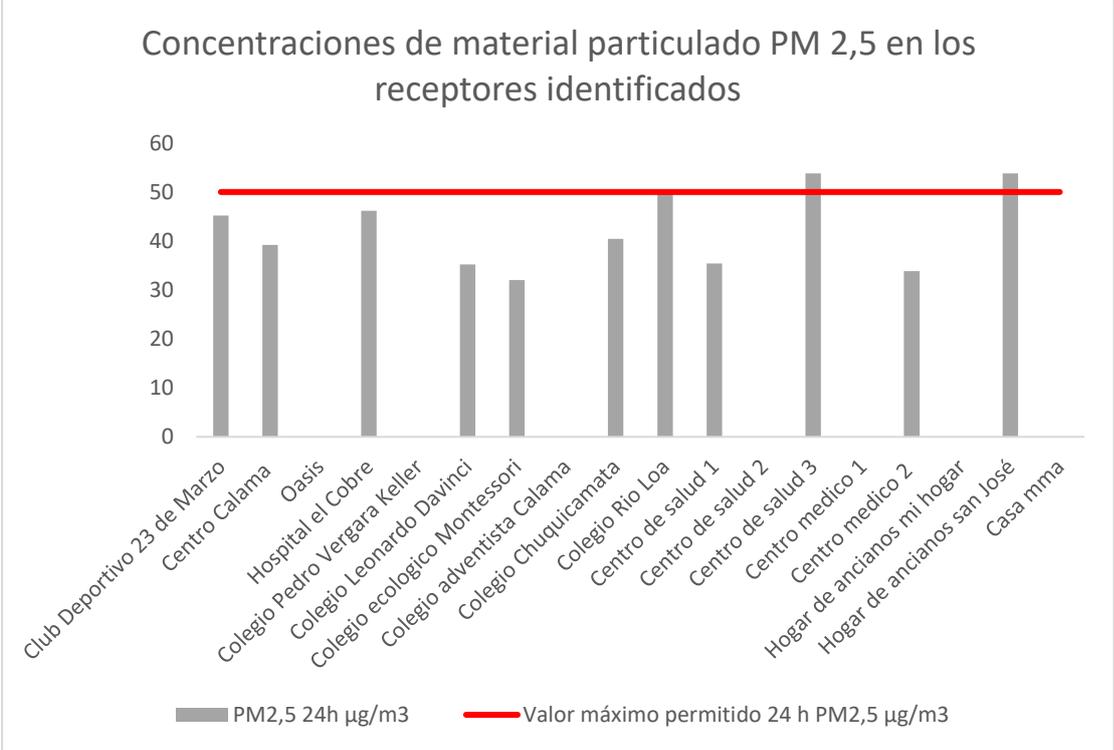
Fuente: Meteosim Modelo Calpuff

Gráfica 9. Comportamiento de las concentraciones de partículas PM10 en los receptores identificados



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10. Comportamiento de las concentraciones de partículas PM2,5 en los receptores identificados



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de emisiones generadas en la etapa de construcción en comparación con la etapa de operación, permite determinar que corresponde al escenario de contaminación más crítico y a partir de este hecho, se radica la necesidad de simular solamente durante este tiempo, en vista que se podría obtener la información con los datos más representativos, que a su vez serían de utilidad para la identificación de las medidas de mitigación; por tanto los datos aportados de concentración y determinación del cumplimiento o no, de la normatividad chilena corresponden únicamente a la etapa de construcción.

3.3 Identificación de actividades de mitigación

Las actividades de mitigación pueden ayudar a reducir significativamente la contaminación atmosférica por material particulado de la mina subterránea, proteger la salud de los trabajadores y minimizar el impacto ambiental en las comunidades circundantes. Es importante adaptarlas a las condiciones específicas de la mina y que se cumplan las regulaciones locales y nacionales relacionadas con la calidad del aire y la seguridad en el trabajo.

El Proyecto Mina Chuquicamata subterránea contempla la implementación de medidas de control y abatimiento de MP10 mediante el uso de sistemas colectores y supresores de polvo en la transferencia de mineral, como también por medio de la humectación de caminos no pavimentados. La tabla 12 muestra un resumen de varios autores, donde se incluyen las fuentes generadoras de PM10, las medidas de control y abatimiento que considera el PMCHS (proyecto mina Chuquicamata subterránea) y la eficiencia de diseño de dichas medidas, incorporadas en la estimación del inventario de emisiones. Respecto a la extracción de aire viciado, los caudales de salida ya incorporan el abatimiento por sistemas colectores y supresores de polvo.

El autor Salazar, 2020 dentro de su trabajo titulado; Diseño de un prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado en las actividades mineras subterráneas, propone el Desarrollo e implementación de un dispositivo móvil diseñado para la detección de monóxido de carbono y partículas suspendidas en entornos de minería subterránea. Este dispositivo está equipado con una alarma audible que se activará en caso de detectar una concentración de monóxido de carbono superior a 50 ppm.

El proceso de identificación de impurezas en el aire se lleva a cabo mediante la utilización de un sensor de monóxido de carbono y un sensor de partículas suspendidas, además de medir la temperatura ambiente mediante un sensor de temperatura. La interpretación de las señales procedentes de estos sensores se realiza mediante un microcontrolador, y los resultados se visualizan en una pantalla LCD. Además, el dispositivo dispone de una batería interna de litio que garantiza su autonomía y facilidad de transporte como equipo portátil. El prototipo incorpora dos tipos de alarmas que emiten señales sonoras para alertar al personal en caso de

detectar monóxido de carbono, lo que permite prevenir o reducir los niveles elevados de contaminantes en el aire, que son perjudiciales y peligrosos para la salud.

Aunque este tipo de prototipo se encuentra enfocado en principalmente en la prevención y medición de las concentraciones de contaminantes, es de importancia destacarlo debido a lo necesario de incentivar esta clase de acciones, para a su vez reducir los niveles actuales, y que las medidas de mitigación sean menores, lo que se podría traducir en menores costo para la remediación del aire.

Otros autores como Terrazas,2021 en su trabajo mitigación del material particulado polvo en el tramo 9 tajo Ferrobamba U. M. Las Bambas – Apurímac pretende reducir el material particulado polvo en suspensión que se genera en las vías de transporte, para ello realiza un diseño experimental. Que tiene como objetivo comparar dos sistemas de mitigación de partículas de polvo en las vías de operación dentro la mina, uno mediante el regado por camiones cisternas e instalación de aspersores, para eludir que la contaminación generada afecte al medio ambiente y la visibilidad de los conductores.

Los resultados del análisis, muestra una disminución de partículas en suspensión PM2.5, para camión cisterna de 2,56 µg/m³ y con aspersores un valor de 1,70 µg/m³, de la misma forma las partículas en suspensión PM10, con camión cisterna es de 7,02 µg/m³ y 6,58 µg/m³ con sistema de riego automático por aspersores; así mismo los costos de realizados aportan que se debe aplicar el sistema de riego automático por aspersores en las vías principales y zonas operativas de la minería.

Tabla 12. Resumen de medidas de control y mitigación

Fuente de emisión de material particulado	Medidas de control y mitigación	Eficiencia	Autor
Marinas - Transporte marinas hacia acopios y botaderos	Humectación de caminos no pavimentados	85%	Knight Piésold Consulting, 2010.
Calles sin pavimentar - Tránsito de Camiones	Control de polvo con bischofita	40%	
Transferencia de mineral	Sistemas colectores y supresores de polvo	85%	
Construcción obras superficiales - Construcción de obras civiles	Prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado, para el control de la contaminación dentro de la mina.	-	Salazar, 2020
Tronaduras - Explosión de roca en la mina			
Nivelación del terreno			
Calles sin pavimentar - Tránsito de Camiones		60%	Terrazas,2021

Erosión eólica - acopio de material	Sistema de riego automático por aspersores		
-------------------------------------	--	--	--

Fuente: Varios Autores

Otras posibles propuestas para el control y mitigación del material particulado podrían ser:

Implementar sistemas de captura de polvo en las áreas de excavación y carga para reducir las emisiones de partículas en el punto de origen.

Mantener un sistema de ventilación eficiente en la mina subterránea para diluir y eliminar las partículas contaminantes. Al igual que utilizar tecnologías de filtración y purificación del aire en los sistemas de ventilación para eliminar las partículas en suspensión.

Implementar un sistema de monitoreo ambiental en tiempo real para detectar y responder rápidamente a aumentos en la concentración de partículas.

Emplear maquinaria y equipos con tecnología avanzada de reducción de emisiones y consumo de combustible, como motores más limpios y filtros de partículas; complementar esta propuesta al fomentar prácticas de mantenimiento preventivo para mantener los equipos en óptimas condiciones.

Realizar evaluaciones periódicas de la calidad del aire y los niveles de exposición de los trabajadores para identificar áreas de mejora, complementando al ajustar y mejorar las medidas de mitigación en función de los resultados de monitoreo y la retroalimentación de los trabajadores.

Implementar sistemas de recolección y recuperación de partículas para reciclar el material particulado y reducir su impacto ambiental.

4. CONCLUSIONES

La mayor concentración de contaminantes por material particulado se presenta en la etapa de construcción de la mina subterránea con una duración de 9 años genera un total de 221945 toneladas de PM10 y 18665 toneladas de PM2,5, en comparación con el total de emisiones generadas en 40 años por la etapa de operación que corresponde a 40654 toneladas de PM 10 y 9357 toneladas de PM2,5; en este caso es importante resalta que se encontrarían instaladas ya las acciones de mitigación propuestas en el documento de declaración de impacto ambiental del proyecto mina Chuquicamata subterránea.

Estos valores de toneladas de PM10 y PM2,5 son generados principalmente por la actividad de transporte de camiones en calles sin pavimentar, situación que coinciden en ambas etapas del proyecto de mina Chuquicamata, a su vez la siguiente actividad que más contamina en el caso de la etapa de construcción corresponde a las tronaduras, debido a que es necesario para crear los niveles de trabajo en la mina, y en cuanto a la etapa de operación la segunda actividad más representativa es la ventilación, debido a que por este medio se extrae todo el aire viciado que se genera en la producción del mineral. Otras actividades que son menos representativas en las dos etapas corresponden a las marinas y transferencia de materiales.

A través de la evaluación de los resultados obtenidos, en referencia a la generación de emisiones de contaminante atmosféricos en la zona de estudio con la simulación con el modelo CALPUFF, se puede determinar que las concentraciones de material particulado de PM10 y PM2.5, se superan en los puntos Hospital el Cobre, Colegio Pedro Vergara Keller, Centro de salud 3, Centro médico 1, hogar de ancianos Mi hogar, hogar de ancianos San José los valores límites permisibles pautados por la normatividad chilena, que corresponden a 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a PM10 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a PM2,5. El máximo valor de PM10 promedio de 24 horas emitido en el receptor número 5 corresponde a 212,93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el máximo valor de PM 2.5 promedio 24 horas en el área de estudio tiene un valor de 53,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y corresponde a los receptores hogar de ancianos Mi hogar y hogar de ancianos San José .

En cuanto al resto de valores de concentración de los parámetros PM10 y PM2,5, obtenidos en el área de estudio resultaron en un porcentaje medio, que al ser comparados se podría decir que fue en menor proporción a los valores establecidos en el estándar de calidad ambiental respectivo.

La adopción de medidas de mitigación se revela como una necesidad inmediata para la reducción de la contaminación atmosférica causada por partículas en la minería subterránea. Estas acciones no solo salvaguardan la salud de los trabajadores, sino que también contribuyen de manera significativa a minimizar el impacto ambiental en las comunidades aledañas, por ende, la utilización de protocolos de rocío de agua alrededor de todas las zonas que se encuentran a cielo abierto, se convierte en la

mejor estrategia para combatir la polución que se genera por el material particulado, al realizarse el tránsito de vehículos, principalmente de aquellos de gran tamaño.

Por otro lado, la innovación se convierte en la clave para continuar con el control y prevención de enfermedades creadas o agravadas por el material particulado, como se puede apreciar a través de la creación de dispositivos portátiles de detección de contaminantes, como el prototipo mencionado, emerge como una herramienta de gran valor para la prevención y el monitoreo de concentraciones de contaminantes en entornos mineros subterráneos. Esta iniciativa no solo resguarda la seguridad de los trabajadores, sino que también puede contribuir a la disminución de costosas medidas de mitigación al mantener los niveles de contaminación bajo control de manera efectiva.

REFERENCIAS

Aburto Salazar, A. 2016. Desarrollar un manual de procedimientos para la planificación de obras de construcción de edificios. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141763>

Aravena, A. 2012. Calama PLUS Masterplan, Calama. (A. Viva, Entrevistador). Disponible en: <https://arquitecturaviva.com/works/plan-urbano-calama-plus-8>

Arregoces, Heli A., Mendoza, Yoma I., & Rojano, Roberto E. 2018. Evaluación del CALPUFF para Estimar Concentraciones Ambientales de PM 10 de una Cantera en Terrenos Complejos. Información tecnológica, 29(5), 131-142. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000500131>

Arrieta-Fuentes, A J. 2016. Dispersión de material particulado (PM 10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. Ingeniería Investigación y Desarrollo, 16(2), 43–54. <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5445>

Beylot, A., Villeneuve, J., 2015. Assessing the national economic importance of metals: an input-output approach to the case of copper in France. Resour. Policy 44,161–165. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.02.007>

Cardemil Winkler, M. 2023. Impactos socioeconómicos de la minería en Chile. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones - Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. En línea, disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34140/1/Informe_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf

Codelco. División Chuquicamata. <https://www.codelco.com/nosotros/la-cooperacion/division-chuquicamata-0>. Citado el 4 agosto de 2023.

Díaz, S. 2014. Sistema integral bajo el enfoque de minería de datos y redes neuronales para la predicción y control de la contaminación atmosférica por pm10 en la ciudad de Chimbote. <https://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14278/3036/42884.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Dorta, P. 1996. Las inversiones térmicas en Canarias. Investigaciones Geográficas (Esp), núm. 15, enero-junio, 1996, pp. 109-124- Instituto Interuniversitario de Geografía. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17654244007.pdf>

European monitoring and evaluation programme (EMEP) / European environmental agency (EEA) . 2019. Air pollutant emission inventory guidebook 2019. 2.A.5.a Quarrying and mining of minerals other than coal. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/2-industrial-processes/2-a-mineral-products/2-a-5-a-quarrying/view>

Escobar, J. Bordones, J. Norambuena, L. Reinoso, A.2011. Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas. AMBIOSIS S.A.

Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía. 2014. Introducción a la minería subterránea. Disponible en: https://oa.upm.es/62726/1/METODOS_MINERIA_INTERIOR_LM1B4T4R0-20200406.pdf

Gutiérrez-Viñuales, A. 2008. Chuquicamata: patrimonio industrial de la minería del cobre en Chile. Apuntes: Revista de Estudios sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies, 21(1), 74-91. Retrieved September 15, 2023, from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632008000100006&lng=en&tlng=es.

Holmes, N.S. Morawska, L.2006. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.003>, Atmos. Environ., 40, 5902-5928

Instituto de asuntos públicos.2016. Estado del medio ambiente en Chile, comparación 1999 a 2015.Centro de análisis de políticas públicas. Universidad de Chile. Disponible en: <http://www.chlorischile.cl/informe1999-2016.pdf#page=46>

Knight Piésold Consulting. Declaración de impacto ambiental proyecto mina chuquicamata subterránea .2010. Disponible en:<https://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/551/1/Knight%20Piesold.%20Declaracion%20de%20impacto%20ambiental%2C%20Proyecto%20Mina%20Chuquicamata%20Subterr%C3%A1nea.pdf>

López, Y. R. A. (2016). “caracterización geotécnica, estructural del macizo rocoso de los desarrollos subterráneos de la fase v, Chuquicamata–Chile”. Universidad nacional de San Agustín. Facultad de geología, geofísica y minas. Disponible en: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/fe62f7f0-3815-491a-953d-d481ac6c52e6/content>

Manzur, M. Benzal, G. González, S.2012. Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. VII Congreso de Medio Ambiente. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26838>

Matias Falcon, M .2021. Modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos influenciado por la actividad minera a través del software de AERMOD en el distrito de Tinyahuarco. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2145>

Méndez, A. 2019. El origen de "atmósfera". Revista Tiempo Y Clima, 5(63). Recuperado a partir de <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/1704>

Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente. 2014.Inventarios nacionales de emisiones a la atmósfera 1990-2012. Análisis por actividades emisoras de la nomenclatura snap-97. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y->

[evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-
/07%20Transporte%20por%20Carretera tcm30-179137.pdf](#)

Möller, D. 2010: Chemistry of the Climate System. Degruiter. isbn: 978-3-11-01979-4. 741 pp.

Normas de calidad del aire de Chile. SINCA. <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma> Citado el 30 de agosto de 2023.

Organización mundial de la salud. Air quality: Data and statistics. Disponible en: <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/data-and-statistics> . Citado el 31 de agosto de 2023.

Palacios, P.2022. Ciudad oasis conexión de flujos urbanos y sistemas naturales en Calama, desierto de Atacama, Chile. Pontificia universidad católica de Chile. Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos. Disponible en: <https://repositorio.uc.cl/xmlui/handle/11534/63716>

Salazar, J.2020. Diseño de un prototipo portátil para la detección del monóxido de carbono y material particulado en las actividades mineras subterráneas. Universidad tecnológica del Perú. <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/4380>

Sarricolea Espinoza, P. Romero Aravena, H. 2015. Variabilidad y cambios climáticos observados y esperados en el Altiplano del norte de Chile. Revista de geografía Norte Grande, (62), 169-183. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000300010>

Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J.2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (p. 521) [Tech. Rep.]. Earth Tech, Inc. [http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF UsersGuide.pdf](http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF%20UsersGuide.pdf)

Sinca. Ministerio de medio ambiente. Estación Hospital el Cobre <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/estacion/index/key/217>. Citado el 23 de agosto de 2023.

Soldevila Bacardit, N. Vinyoles Bargalló, E. Agudo Ugena J. Camps Vila, L.2018. Contaminación atmosférica, riesgo cardiovascular e hipertensión arterial, Hipertensión y Riesgo Vascular, Volume 35, Issue 4. Pages 177-184, ISSN 1889-1837. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1889183718300345>

Sonami. Sociedad Nacional de Minería. Minería de Chile en cifras.2020. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/#caracterizacion-de-la-mineria>

The World Bank. 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. <https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climates-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf>

Venegas, L. Mazzeo, N. 2012. La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. II Congreso Latinoamericano de Ingeniería de Vientos

(CLIV) (La Plata, 5, 6 y 7 de diciembre de 2012). Laboratorio de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental; Grupo Fluidodinámica Computacional. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/100066>

ANEXOS

A. Inventario de emisiones atmosféricas

Fuente calles sin pavimentar

$E_{anual} = e * F * L * (365 - d)$						
E anual: Emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar (g/día)						
E: Factor de emisión de partículas por calle (g/vehículo-km)						
F: Flujo de vehículo diario (vehículo/día)						
L: Longitud del tramo (km)						
d: Número de días con precipitaciones mayores a 0,25 mm						
Factor de emisión						
Caminos al interior de establecimientos industriales (áridos, rellenos sanitarios, establecimientos industriales en general)						
$E = k \left(\frac{s}{12} \right)^a \left(\frac{W}{3} \right)^b$						
Donde:						
E: factor de emisión [lb/millas recorridas].						
k: factor de corrección por tamaño de partículas [adimensional], (k = 1,8 para PM10)						
s: contenido de partículas finas en la superficie de la calle [%].						
a; d: constantes						

Valores para constantes según tamaño de partícula						
Tamaño de partícula	K (lb/VMT)	a	b			
MP30 (PTS)	4,9	0,7	0,45			
MP 10	1,5	0,7	0,45			
MP 2,5	0,15	0,9	0,45			

Año			Factor de emisión 50		Factor de emisión 30	
	Vehículos 50	ehículos 30	PM 10	PM 2,5	PM 10	PM 2,5
2010	54	49	19,47	1,70	45,46	3,96
2011	11303	4444	0,09	0,01	0,50	0,04
2012	10157	4946	0,10	0,01	0,45	0,04
2013	9751	4410	0,11	0,01	0,50	0,04
2014	3795	2298	0,28	0,02	0,97	0,08
2015	2753	2417	0,38	0,03	0,92	0,08
2016	1518	1295	0,69	0,06	1,72	0,15
2017	1267	1150	0,83	0,07	1,93	0,17
2018	744	83	1,41	0,12	26,88	2,34
Total	41340	21089				

Vehiculos dia					
Año	Toneladas marinas	Camiones / año	camiones/ día	Camiones/ año	camiones/día
2010	17365	54,01	0,15	48,88	0,13
2011	1898192	11302,50	30,97	4443,56	12,17
2012	1991566	10157,05	27,83	4945,71	13,55
2013	1810465	9750,66	26,71	4409,77	12,08
2014	879127	3794,53	10,40	2298,00	6,30
2015	862643	2752,67	7,54	2416,70	6,62
2016	464279	1518,30	4,16	1294,55	3,55
2017	408192	1266,72	3,47	1149,52	3,15
2018	62000	744,00	2,04	82,67	0,23
Total	8393829	41340	113	21089	58

Longitud del tramo			Los datos de precipitacion corresponden a la estacion meteorologica de hospital el cobre	
Año	km/año	total km	Año	Días con precipitaciones mayores a 0,25 mm
2010	209	1344	2010	0
2011	20636	69314	2011	0
2012	23567	92419	2012	1
2013	21726	80680	2013	1
2014	10550	48885	2014	1
2015	10352	64883	2015	1
2016	5572	34077	2016	1
2017	4898	31567	2017	1
2018	744	1240	2018	0
Total	98254	424409	Total	6

Fuente tubo de escape

$E_T = E_c + E_f$			
Et: total de emisiones		no se considera en frio por el tamñana del vehiculo según copert 4	
Ec: emisiones con motor en caliente			
Ef: emisiones con motor en frio			
EMISIONES EN CALIENTE			
$E_c = ec * R$		Factor de emision PM 10	0,198
Ec: emisiones con motor en caliente g/año			
ec: factor de emisión del contaminante g/km			
R: recorrido total de los vehiculos de la clase ien la unidad de tiempo(normalmente el año).			
Tipo de camion	50 tm	300 tm	
Año	km/año	km/año	
2010	209	1135	
2011	20636	48678	
2012	23567	68852	
2013	21726	58954	
2014	10550	38335	
2015	10352	54531	
2016	5572	28505	
2017	4898	26669	
2018	744	496	
Total	98254	326155	

Fuente marinas

$E = k * \frac{0,0029 * d^{0,7}}{M^{0,3}}$		Factor Emision PM 10 kg/m3
		0,02561944
E: Emision de particulas kg/m3		
k: factor de emisión (adimensional)		Factor Emision PM 2,5 kg/m3
d: Altura de caída del material (metros)		
M: humedad del material %		0,00058071
Factor de emision PM10	0,75	
Factor de emision PM 2,5	0,017	
Altura de caída	54,28	
Humedad del material	3	
Factor de emisión		
PM 10	0,75	
PM 2,5	0,017	

Fuente nivelación

$0,0056 * S^2 * K$			
K: Factor de emision adimensional PM 10		0,6	
K: Factor de emision adimensional PM 2,5		0,031	
S = Velocidad media del vehículo(kph)			
Unidades	kg/VKT		
Velocidad media del vehiculo en millas por hora		9,32	
Factor Emision de PM10 kg/ km de recorrido del vehiculo			
	0,29189336		
Factor Emision de PM10 kg/ km de recorrido del vehiculo			
	0,01508116		

Fuente erosión eólica

		Año	Factor de emision PM10
$E = FE * Am$		2010	489,69
		2011	314,64
E : Emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [kg/día].		2012	503,76
FE : Factor de emisión de PTS kg-día/ha de superficie activa		2013	480,52
Am : Área expuesta [Ha]		2014	560,86
		2015	611,13
Erosión Eólica desde pilas de acopio		2016	606,08
Determinación del Factor de Emisión para PTS y MP10.		2017	576,27
		2018	594,83
$FE = 1.9 \left(\frac{s}{1.5} \right) \left(\frac{f}{15} \right) \left(\frac{365 - p}{365} \right)$			
Donde:			
FE : Factor de emisión de PTS kg-día/ha de superficie activa			
s	: Contenido de Silt en %.		
f	: porcentaje de tiempo en que el viento excede 5,4 (m/s)		
p	: días con precipitación sobre 0,25 mm de agua		
Relación MP10/PTS = 0,5			

Contenido de limo %	6						
Porcentaje de tiempo que el viento excede 5,4 m/s y días de precipitación mayor a 0,25mm según datos de la estación de hospital el cobre							
Año	horas con vientos mayores a 5,4 m/s	Numero de días con vientos mayores a 5,4 m/s		Año	Días con precipitaciones mayores a 0,25 mm		
2010	1933	22,06621005		2010	0		
2011	1242	14,17808219		2011	0		
2012	1994,00	22,76255708		2012	1		
2013	1902	21,71232877		2013	1		
2014	2220,00	25,34246575		2014	1		
2015	2419,00	27,61415525		2015	1		
2016	2399,00	27,38584475		2016	1		
2017	2281,00	26,03881279		2017	1		
2018	2348,00	26,80365297		2018	0		
Total	18738			Total	6		

Determinación del Área de la pila expuesta.

$$Am = b * h$$

Am : Area expuesta [Ha]

b : base de la pila

h : Altura de la pila

b 76

h 120

Am 0,912

Fuente ventilación

Concentracion media igual mg/m3			2,19
Años	Caudal m3/min	mg/min	ton/año
2011	2237	4899,03	2,57
2012	4476	9802,44	5,15
2013	6713	14701,47	7,73
2014	8950	19600,50	10,30
2015	11187	24499,53	12,88
2016	13427	29405,13	15,46
2017	15664	34304,16	18,03
2018	17901	39203,19	20,61
Total	80555	176415,45	92,72

Fuente transferencia de materiales

Factores de emisión				
$E = k * 0.0016 * \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}} [Kg/ton]$				
E: factor de emisión (kg/ton de material transferido)				
k: multiplicador del tamaño de partícula, adimensional				
U: velocidad promedio del viento (m/s)				
M: contenido de humedad del material (%)				
Valor de k				
Multiplicador del tamaño de partícula aerodinámica (k)				
<30 µm	<15 µm	<10 µm	<5 µm	<2,5 µm
0,74	0,48	0,35	0,2	0,053
Cantidad de material cargado				
TM				
2018	1800000			
multiplicador del tamaño de partícula, adimensional			0,35	
multiplicador del tamaño de partícula, adimensional			0,053	
velocidad promedio del viento (m/s)			5,6	
contenido de humedad del material (%)			3	