



Simulación de dispersión de contaminantes en una explotación minera.

Daidé López Valdivia

Trabajo entregado para la obtención del grado de Máster en
“Tecnología Ambiental”

Modalidad: “Investigación”

Septiembre / 2022

Director:

Raúl Arasa Agudo

D. Raúl Arasa Agudo, DNI:38124658L y Director de Operaciones de Meteosim SL.

INFORMA:

Que el trabajo titulado “**Simulación de dispersión de contaminantes en una explotación minera**” presentado por **Dña. Daidé López Valdivia**, con **N.I.E.: Y9006892Z**, ha sido realizado utilizando herramientas de “**Meteosim SL**”, bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: Trabajo de Investigación), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 19 de septiembre de 2022

A handwritten signature in black ink, reading "Raúl Arasa", enclosed within a large, loopy oval flourish.

Fdo.: Raúl Arasa Agudo

RESUMEN

La contaminación atmosférica por material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ es una de las mayores preocupaciones actualmente a nivel mundial, debido a las disímiles consecuencias que puede provocar a la salud humana y al medio ambiente de forma general. Dichos contaminantes tienen su origen a partir de distintas fuentes procedentes de la acción del hombre, entre ellas el caso de estudio que se analiza en el presente trabajo. La minería a cielo abierto es una de las actividades productivas que mayores beneficios aporta al desarrollo económico de las naciones, pero a su vez constituye una actividad con un alto potencial de contaminación al medio ambiente, principalmente por la emisión de material particulado.

El objetivo principal de la investigación realizada en este trabajo ha sido determinar el impacto ambiental que producen las actividades desarrolladas en Mina Sierra Miranda sobre el entorno cercano a la explotación minera. Para ello, se realizó una extensa labor de recopilación de datos de la mina a partir de los cuales se identificaron las actividades operacionales fundamentales que se desarrollan en la misma y que constituyen las principales fuentes generadoras de PM_{10} y $PM_{2,5}$. Posteriormente, se calcularon los factores de emisión de cada una de las actividades identificadas, lo que permitió obtener el inventario de emisiones de la mina estudiada.

Los resultados alcanzados mostraron que el tránsito de los camiones por caminos no pavimentados de forma general representa las mayores contribuciones de los contaminantes a las emisiones totales de la mina, principalmente en la ruta de la mina hacia el botadero de estériles siendo el 64% de las emisiones totales de PM_{10} y el 72% de las emisiones de $PM_{2,5}$. Además, evidenció que luego de esta actividad, la que mayores emisiones aporta es la erosión eólica de los acopios de materiales producto de la acción del viento, con una contribución del 20% y el 23% de PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente; mientras que las emisiones de los tubos de escape de las maquinarias empleadas constituyen las de menor impacto del total de emisiones con un 0,01%.

A partir de la plataforma DMScloud de Meteosim SL, se introdujeron los datos del inventario de emisiones en el modelo de calidad del aire CALPUFF, el que se decidió emplear para realizar las simulaciones de la dispersión de contaminantes diarios y anuales en el área de estudio, debido a que las características topográficas de Sierra Miranda en Chile son complejas y este modelo se adecúa perfectamente a las necesidades del área de modelación.

Finalmente, los resultados lanzados por la simulación mostraron que a pesar de que, en el interior de la explotación minera los valores son relativamente elevados, llegando a superar los valores límites permitidos en la Norma de la Calidad del Aire de Chile, en el entorno circundante las contribuciones de material particulado son muy pequeñas, por lo que dicha mina no representa un problema para la calidad del aire de la zona en la que se encuentra emplazada.

ABSTRACT

Atmospheric pollution by PM₁₀ and PM_{2,5} particulate matter is currently one of the greatest concerns worldwide, due to the dissimilar consequences it can cause to human health and the environment in general. These pollutants have their origins from different sources from the action of man, including the case of study analyzed in this paper. Open pit mining is one of the most productive activities that contributes to the greatest benefits to the economic development of nations, but at the same time it constitutes an activity with a high pollution potential for the environment, mainly due to the emission of particulate matter.

The main objective of this research has been to determine the environmental impact produced by activities carried out in Mina Sierra Miranda on the environment close to the mining exploitation. For this, an extensive work of data collection of the mine was carried out, from which the main operational activities constitute the most important generating sources of PM₁₀ and PM_{2,5}. Subsequently, the emission factors of each of the identified activities were calculated, which allowed obtaining the emissions inventory of the studied mine.

The results obtained showed that the transit of trucks on unpaved roads generally represents the greatest contribution of pollutants to the total emissions of the mine, mainly on the route from the mine to the waste dump, being 64% of the total PM₁₀ emissions and 72% of PM_{2,5} emissions. In addition, it showed that after this activity, the one that contributes the greatest emissions is the wind erosion of the stockpiles of materials produced by the action of the wind, with a contribution of 20% and 23% of PM₁₀ and PM_{2,5} respectively, while the emissions from the exhaust pipes of the machinery used constitute the ones with the least impact of the total emissions with 0.01%.

Using the Meteosim SL DMScloud platform, the emissions inventory data was entered into the CALPUFF air quality model, use to perform the simulations of daily and annual pollutant dispersion in the study area. The main selection criteria to use this model, was born from the topographical characteristics of Sierra Miranda in Chile which are complex, and this model is perfectly suited to the needs of the modeling area.

Finally, the results released by the simulation showed that despite the fact that, inside the mining exploitation, the values are relatively high, exceeding the limit values allowed in the Chilean Air Quality Standard, in the surrounding environment the contributions of particulate material are very small, so this mine does not represent a problem for the quality of the air in the area where it is located.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Raúl por tanta paciencia y dedicación ...

A la Universidad Internacional de Andalucía por darme la oportunidad de cursar el Máster Universitario de Tecnología Ambiental...

Al director del máster Rafael por la gran labor que realiza y al claustro de profesores de la Universidad de Huelva por su excelente preparación docente...

A mis padres por su apoyo incondicional a pesar de la distancia y por todo su amor...

A mi esposo por ayudarme a cumplir mis metas porque sin él este sueño no hubiese sido posible...

A mis hermanos y abuelos por su apoyo constante y por tanto cariño...

A mi amiga del corazón Elizabeth, por sus buenos consejos en los momentos difíciles y porque a pesar de la distancia nada nos ha podido separar...

A mis amigos Daniel y Miguel por tantos años de amistad y por su apoyo absoluto...

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Estado del arte	1
1.2. Contaminación del aire por la minería.....	2
1.2.1. Minería a cielo abierto	2
1.3. Contaminación del aire por la minería en Chile. La región de Antofagasta.....	3
1.4. Material particulado.	5
1.4.1. Material particulado producto de actividades mineras.	5
1.4.2. Normativa chilena de la calidad del aire.....	7
1.5. Inventario de emisiones.	8
1.6. Objetivo general.	8
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.	10
2.1.1. Características climáticas de la zona de estudio.....	11
2.1.2. Análisis de la línea de base de la calidad del aire en Mina Sierra Miranda.	12
2.1.3. Análisis meteorológico local.	15
2.2. Cálculo del inventario de emisiones.	20
2.2.1. Identificación de las fuentes de emisión.....	20
2.2.2. Factores de emisión.	21
2.2.3. Parámetros de cálculo.....	23
2.2.4. Emisiones del material particulado.....	25
2.3. Modelo de calidad del aire utilizado. Simulación de contaminantes.	26
2.3.1. Modelo CALPUFF.....	26
2.3.2. Simulación de contaminantes.....	27
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	30
3.1. Resultados obtenidos del inventario de emisiones de PM ₁₀ y PM _{2,5} para las fuentes estudiadas.	30
3.2. Comparación de emisiones de PM ₁₀ y PM _{2,5} por actividad.	33
3.3. Resultados de la simulación de dispersión de PM ₁₀ y PM _{2,5} realizada a partir del modelo CALPUFF.....	34
3.3.1. Actividades con mayor contribución a las emisiones totales.	39
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS.....	43
ANEXOS.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia típica de trabajo en una mina a cielo abierto	3
Figura 2. Polvo generado por un camión minero durante el transporte de materiales en vías no pavimentadas	6
Figura 3. Emisiones de polvo producto a tronaduras en una mina a cielo abierto	6
Figura 4. Contaminación generada producto a la acción del viento en acopio de materiales.....	7
Figura 5. Localización de la Mina Sierra Miranda	10
Figura 6. Variación de la precipitación y temperatura media anual en la Región de Antofagasta.	11
Figura 7. Mapa de localización de la Estación de Calidad del Aire “Antofagasta” y de la Estación Meteorológica de Cerro Moreno con respecto a Mina Sierra Miranda	12
Figura 8. Comportamiento diario de la concentración de PM ₁₀ (µg/m ³) en el período de 2017-2021. .	13
Figura 9. Comportamiento diario de la concentración de PM _{2,5} (µg/m ³) en el período de 2017-2021. .	13
Figura 10. Valores promedios anuales de la concentración de PM ₁₀ (µg/m ³) en el período de 2017-2021.....	14
Figura 11. Valores promedios anuales de la concentración de PM _{2,5} (µg/m ³) en el período de 2017-2021	14
Figura 12. Comportamiento de la velocidad del viento media mensual (km/h) en el período de 2017-2021.....	15
Figura 13. Evolución anual del viento medio (km/h)	16
Figura 14. Dirección predominante y rangos de intensidad en nudos (kt) para los años 2017,2018,2019,2020 y 2021 siguiendo el mismo orden de la figura	16
Figura 15. Ciclo diario anual del viento (m/s) en Mina Sierra Miranda	17
Figura 16. Dirección predominante y rangos de intensidad del viento en m/s en Mina Sierra Miranda.	18
Figura 17. Evolución de los valores mínimos, medios y máximos mensuales de temperatura (°C) para el período de 2017-2021.	19
Figura 18. Valores medios anuales de temperatura (°C) para el período de 2017-2021.	19
Figura 19. Valores anuales de las precipitaciones (mm) para el período de 2017-2021.	20
Figura 20. Ubicación en la mina de cada fuente de emisión.	27
Figura 21. Malla de resolución 1km definida para la simulación.....	28
Figura 22.Emisiones de PM ₁₀ (kg/año) por tipo de actividad.....	31
Figura 23.Emisiones de PM _{2,5} (kg/año) por tipo de actividad	33
Figura 24. Gráfico comparativo entre las emisiones totales de PM ₁₀ y PM _{2,5} por actividad.	34
Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones diarias (24 horas) de PM ₁₀ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera	35
Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones anuales de PM ₁₀ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera.	36
Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones diarias (24 horas) de PM _{2,5} y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera	37

Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones anuales de $PM_{2,5}$ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera 38

Figura 29. a) Mapa de concentración anual de PM_{10} considerando todas las fuentes. b) Mapa de concentración anual de PM_{10} correspondiente a la actividad de carga de estéril. c) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de PM_{10} considerando todas las fuentes. d) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de PM_{10} correspondiente a la actividad de transportación de estéril por caminos no pavimentados (ruta mina-botadero)..... 40

Figura 30. e) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2,5}$ considerando todas las fuentes. f) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2,5}$ correspondiente a la erosión eólica del acopio de estéril. g)-h) Mapas de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2,5}$ correspondientes a las actividades de circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta del botadero-mina) y circulación de camiones cargados (transportación de estéril) por caminos no pavimentados respectivamente 40

Figura 31. i) Mapa de concentración anual de $PM_{2,5}$ considerando todas las fuentes. j) Mapa de concentración anual de $PM_{2,5}$ correspondiente a la erosión eólica del acopio de estéril 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Normativa chilena de la calidad del aire para PM ₁₀ y PM _{2,5} . Fuente: (SINCA)	8
Tabla 2: Factores de emisión de PM ₁₀ y PM _{2,5}	21
Tabla 3: Factores de emisión para PM ₁₀ y PM _{2,5} según tipo de vehículo.	23
Tabla 4: Datos operacionales de la Mina	23
Tabla 5: Aspectos técnicos de los vehículos.....	23
Tabla 6: Características técnicas de interés	24
Tabla 7: Expresiones para el cálculo de las emisiones de material particulado	25
Tabla 8: Perfiles de emisión.	28
Tabla 9: Correspondencia entre las fuentes de emisión y los perfiles asignados.	29
Tabla 10: Ubicación de los receptores a partir de sus coordenadas UTM obtenidas utilizando el Datum WGS-84 y huso geográfico 19 K.....	29
Tabla 11: Inventario de emisiones para PM ₁₀	30
Tabla 12: Inventario de emisiones para PM _{2,5}	32
Tabla 13: Resumen de las emisiones de PM ₁₀ y PM _{2,5} por actividad	33
Tabla 14: Valores de las concentraciones totales diarias y anuales para PM ₁₀ y PM _{2,5} que afectan a cada punto receptor.....	39

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Estado del arte

La contaminación atmosférica y el deterioro de la calidad del aire tiene sus inicios desde el nacimiento de las civilizaciones. Los cambios producidos en la atmósfera en los últimos dos siglos han sido a un ritmo acelerado (Boldo, 2016).

Según la EPA (Environmental Protection Agency) la contaminación atmosférica o del aire se puede definir como “la presencia de contaminantes o sustancias en el aire que interfieren con la salud o el bienestar humano, o producen otros efectos perjudiciales para el medio ambiente”(EPA, 2009a).

Existen dos fuentes de contaminación, clasificadas en naturales y antropogénicas, siendo esta última la provocada por la acción del hombre y a su vez se encuentra directamente relacionada con el desarrollo de la industria, la agricultura, el transporte terrestre, aéreo y marítimo, el uso de combustibles fósiles y las actividades humanas en general (Boldo, 2016).

Datos proporcionados por la OMS (Organización Mundial de la Salud) indican que cada año 7 millones de personas fallecen debido a la contaminación atmosférica a la que se exponen, la que provoca padecimientos mortales tales como cáncer de pulmón, enfermedades cerebrovasculares, cardíacas y pulmonares crónicas, entre muchas otras afecciones (OMS, 2021).

Este fenómeno constituye en la actualidad uno de los problemas más graves y preocupantes para el medio ambiente y la salud humana. Estudios revelan que el crecimiento de la urbanización se encuentra estrechamente relacionado a la disminución de la calidad del aire, previéndose que para el año 2050 esta será la principal causa de muerte de niños, esencialmente por respirar material particulado (Duque T., 2016).

La OMS señala en sus publicaciones más actuales que el material particulado en suspensión, o sea, las partículas con un diámetro menor de 10 micras o menos (PM_{10}) y las de un diámetro menor de 2,5 micras ($PM_{2,5}$), es el contaminante con más impacto sobre la salud humana (World Health Organization, 2013), razón por la cual, a nivel mundial es el más estudiado (Querol, 2018).

Según las Academias Nacionales de Ciencias de Sudáfrica, Brasil, Alemania y los Estados Unidos y la Academia Nacional de Medicina de los EE.UU. la contaminación del aire es una emergencia de salud a nivel global (Neira, 2019). Algunos estudios de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico muestran que este fenómeno provocará un aumento de su costo, que pasará, de un 0,3% al 1% del PIB para el año 2060, mientras que datos proporcionados por el Banco Mundial hacen referencia a pérdidas económicas de \$USD225 billones relacionadas a las muertes por la contaminación del aire (Duque T., 2016).

La contaminación atmosférica se considera un problema que afecta a nivel local, nacional y mundial pues las partículas o gases expulsados al aire no solo tienen la

capacidad de contaminar la zona desde donde se emiten, sino también de ser transfronterizos, o sea, de transportarse a través de la atmósfera hacia otras regiones o países. Por esta razón y todo lo anteriormente expuesto la OMS publicó en el año 2005 las directrices sobre este tema, con el objetivo de orientar a las naciones sobre los umbrales y límites que no se deben superar para lograr una mejor calidad del aire y por tanto mayores índices de salud y de recuperación medioambiental (Zuazo Urionabarrenetxea, 2018).

1.2. Contaminación del aire por la minería

La minería es un sector que se ha desarrollado desde los inicios de la humanidad, y se ha convertido con el paso del tiempo en una de las industrias esenciales para el desarrollo económico de las naciones, debido a los elevados beneficios que generan a la sociedad a nivel mundial (Cantos Zambrano, 2019). Esta actividad, no solo permite extraer las materias primas indispensables para otros procesos industriales y para la elaboración de disímiles productos, si no que además, constituye una actividad con un alto potencial de contaminación al medio ambiente.

Las minas ocasionan emisiones de contaminantes a la atmósfera en cada una de las etapas de su ciclo de vida, siendo la fase de explotación la que mayores concentraciones aporta, pues se generan fluidos químicos que provocan la contaminación de las aguas y los suelos cercanos, y producen gran cantidad de polvo como consecuencia de las voladuras, el tránsito de los camiones por caminos no pavimentados, el proceso de carga y descarga de los materiales, entre otras actividades. Por tal motivo se hace necesario disminuir el impacto que genera en el medio y adoptar medidas que permitan un desarrollo socioeconómico sostenible (Oyarzun et al., 2011).

En la actualidad existen tres métodos para realizar la extracción de minerales: el método de explotación por sondeo, por minería subterránea y el método a cielo abierto (Quijano Hurtado, 2013) y (Herrera Herbert, 2006). El caso de estudio tratado en este trabajo se ha desarrollado sobre una mina a cielo abierto.

1.2.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto es aquella en la que la extracción del mineral se realiza en la superficie del terreno, debido principalmente a que el mineral a extraer se encuentra cercano a la superficie o porque las condiciones geológicas que existen no permiten la construcción de estructuras subterráneas (Hilson & Nayee, 2001).

Este tipo de minas, se caracterizan por la gran cantidad de material que hay que trasladar y el empleo de maquinarias de gran envergadura. La relación estéril/mineral que se tiene en cuenta para extraer este último, se determina a partir de la disposición del yacimiento y el recubrimiento e intercalaciones de material estéril. Este parámetro, comúnmente denominado "ratio", varía mucho de un yacimiento a otro, pero en todos los yacimientos determina la viabilidad económica de la actividad minera y por lo tanto la profundidad a la que se puede llegar con la minería a cielo abierto (Quijano Hurtado, 2013).

Las minas a cielo abierto provocan un elevado impacto ambiental, siendo uno de los más significativos la contaminación del aire por la emisión de material particulado (PM₁₀ y PM_{2,5}). Esta ocurre por consecuencia directa de diferentes actividades que se desarrollan en este tipo de minería, tales como: las voladuras o tronaduras, las perforaciones del terreno, el proceso de carga y descarga del material, ya sea estéril o mineral, el traslado de los materiales en camiones mineros a través de caminos no pavimentados, la erosión eólica de los minerales y estériles expuestos, producida por la acción del viento y los procesos de nivelación y excavación en la superficie, el chancado y molienda del mineral, y la lixiviación y fundición (Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales, 1997).

En la figura 1 se muestra la representación de una secuencia típica de trabajo en las minas a cielo abierto.



Figura 1. Secuencia típica de trabajo en una mina a cielo abierto. Fuente: (Carrillo Montero & González Valle, 2008)

1.3. Contaminación del aire por la minería en Chile. La región de Antofagasta

A escala mundial los continentes que mantienen un desarrollo continuo en la minería son Asia, América y Oceanía, con países que presentan los mayores niveles de producción de minerales metálicos y no metálicos. Entre ellos vale destacar la producción de China, Rusia, Perú, Australia, Estados Unidos, México, India, y Chile, siendo, en este caso China la mayor productora de oro, silicio y azufre, México de plata y Chile de cobre y yodo. Chile es uno de los países con más riquezas minerales a nivel mundial, que desarrolla la actividad minera desde el siglo XIX y en la actualidad es el principal productor de cobre. En el año 2020 los niveles de producción de cobre se sitúan en torno a los 5.773 miles de toneladas métricas, representando un 28,5% de la producción mundial (SERNAGEOMIN, 2020).

Según (Jorratt, 2021) , en la última década la industria minera representó un promedio del 11% del PIB de Chile, y la minería del cobre contribuyó al 10% del PIB del país.

La actividad minera en Chile se concentra en la región norte del país, caracterizada por ser una zona desértica que no posee mucho desarrollo en otros sectores productivos como la agricultura, por tanto, la minería constituye la principal fuente de desarrollo económico de la mayoría de las ciudades y pueblos de la zona. Los impactos ambientales de la minería pueden llegar a ser importantes a nivel local, en especial la contaminación atmosférica, generada por las fundiciones de cobre (Lagos, 2014).

Las fuentes de emisión de contaminantes más comunes en Chile son la calefacción de los hogares, el transporte y las actividades industriales. En Antofagasta, la región de estudio de este trabajo, se considera que las fuentes principales son las centrales termoeléctricas, los puertos, las fundiciones y las minas a cielo abierto (Bravo Vergara, 2019) siendo el material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$), SO_2 y NO_x los principales contaminantes emitidos (Gligo Viel & Boll Stiftung, 2016).

Un estudio realizado sobre la contaminación antropogénica en la región de Antofagasta, a partir de la comparación de los metales pesados existentes en esta región con respecto a países como China y Pakistán y otras ciudades de Chile, mostraron que Antofagasta presenta mayor concentración de cinc, cobre y arsénico que las anteriores mencionadas y que el polvo de dicha ciudad está compuesto por los metales citados. La exposición de la población a índices de calidad del aire con tal deterioro produce peligros para la salud como el desarrollo de enfermedades prenatales, cáncer, cambios neurológicos, entre muchos otros (Tapia et al., 2018).

Especialistas de la Universidad de Chile informan que alrededor del 60% de la población se encuentra expuesta a concentraciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ superiores a lo permitido por la regulación ambiental, causando cerca de 3.000 hospitalizaciones y 4.500 defunciones cada año (Universidad de Chile, 2021).

En Chile, durante los siglos XIX y la mayor parte del XX, no existía un decreto o norma que regulara la contaminación provocada por la actividad minera. La toma de conciencia ambiental no se evidenció por parte de las autoridades hasta el año 1990, cuando se comenzaron a plantear acciones para disminuir y eliminar la contaminación atmosférica provocada por el sector minero (Biblioteca Nacional de Chile, 2021).

Aunque la nación chilena forma parte de los países con mayor desarrollo económico en Suramérica, tiene graves problemas de contaminación del aire. Como consecuencia se ha promovido el desarrollo de una serie de normas para regularizar y controlar la calidad del aire, que a grandes rasgos sigue la normativa de la EPA (Gatica Eguiguren, 2020).

La contaminación del aire en la nación chilena está regulada bajo la normativa del Decreto Supremo N.º 12/2022 y N.º 12/2010 que establece la norma de calidad primaria para material particulado respirable PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente regulada por el Ministerio del Medio Ambiente.

1.4. Material particulado

Los principales componentes de la materia particulada son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. El PM (Material Particulado) es un contaminante atmosférico que se compone de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire (OMS, 2021).

Las partículas que poseen un diámetro menor de 2,5 micrómetros, conocidas como PM_{2,5}, son muy peligrosas para la salud humana pues tienen la capacidad de entrar hasta los alvéolos pulmonares y al torrente sanguíneo. Por otra parte, las partículas con un diámetro de 10 micrómetros o menos, conocidas como PM₁₀, suelen depositarse en la faringe, tráquea, bronquios y nariz, lo que permite su expulsión del sistema respiratorio, aunque en algunos casos pueden pasar al sistema digestivo (Zuazo Urionabarrenetxea, 2018).

Estudios científicos aseguran que la exposición de la población al material particulado puede ocasionar infartos al miocardio, una reducida función pulmonar, enfermedades respiratorias como asma agravada e irritación de las vías respiratorias, la muerte prematura de personas con padecimientos pulmonares y cardíacos (EPA, 2022). El PM₁₀ y PM_{2,5} se encuentra directamente asociado a la aparición del cáncer de pulmón, al déficit cognitivo, enfermedades neurodegenerativas y desórdenes neurológicos (Galvis-Vizcaíno et al., 2021).

1.4.1. Material particulado producto de actividades mineras

Como se ha mencionado en epígrafes anteriores, en una mina a cielo abierto existen múltiples actividades que generan material particulado.

Entre los procesos que ocasionan las mayores emisiones de polvo en una mina se encuentra el transporte de los minerales y estériles en camiones de alto tonelaje a través de caminos sin pavimentar. A esta actividad se le atribuye del 60-70% del polvo que se produce en las minas y se considera de alto riesgo para los operadores de los vehículos debido a la inhalación de material particulado; además produce una menor visibilidad al conductor (Alvear Parraguez & Olivares Cisternas, 2020).

En comparación con las minas subterráneas, la minería a cielo abierto ocasiona mayores emisiones de partículas debido a las actividades inherentes a ella: las tronaduras o voladuras, las perforaciones, excavaciones y operaciones de carga y descarga de mineral y estéril producto del vertido del material sobre las unidades de transporte y descarga en depósitos (Cantos Zambrano, 2019). Otra fuente importante de emisión de material particulado es la erosión de acopios de materiales producto a la acción del viento.



Figura 2. Polvo generado por un camión minero durante el transporte de materiales en vías no pavimentadas. Fuente: (Arellano & Albert, 2017)



Figura 3. Emisiones de polvo producto a tronaduras en una mina a cielo abierto. Fuente: (Burgada, 2018)



Figura 4. Contaminación generada producto a la acción del viento en acopio de materiales.
Fuente:(Blondel, 2021)

1.4.2. Normativa chilena de la calidad del aire

La normativa de aplicación es una herramienta diseñada para conservar los buenos indicadores de calidad ambiental y proteger la salud humana mediante el establecimiento de los valores límites para cada contaminante.

La normativa ambiental de Chile se basa en la Ley N° 19.300, modificada por la Ley N°20.417/2010, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y actualmente existen diferentes normativas en dependencia de los contaminantes (SINCA).

Según el SINCA (Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire), la normativa empleada para los contaminantes tratados en este trabajo es la Norma de calidad del aire para PM_{10} D.S. N.º 12/2022 del Ministerio del Medio Ambiente publicada el 4/06/2022 y la Norma de calidad del aire para $PM_{2,5}$ D.S. N.º 12/2010 del Ministerio del Medio Ambiente publicada el 09/05/2011.

En la tabla 1 se resume la normativa chilena empleada en este estudio para cada contaminante, con sus valores límites y tiempo de medición.

Tabla 1: Normativa chilena de la calidad del aire para PM₁₀ y PM_{2,5}. Fuente: (SINCA)

Contaminante	Normativa	Valor límite	Período	Condiciones de superación
PM ₁₀	D.S. N.º 12/2022	130 µg/m ³	24 horas	1-Cuando en un año el valor del percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas, sea mayor o igual a 130 µg/m ³ 2- Si antes que culmine el año se superan los 7 días con valores superiores al valor límite anual
		50 µg/m ³	1 año	Cuando el promedio aritmético de 3 años consecutivos sea mayor o igual a 50 µg/m ³
PM _{2,5}	D.S. N.º 12/2010	50 µg/m ³	24 horas	Cuando el percentil 98 de los promedios diarios registrados durante un año, sea mayor a 50µg/m ³
		20 µg/m ³	1 año	Cuando el promedio aritmético de 3 años consecutivos supere el valor límite anual

1.5. Inventario de emisiones

Según (Dios Noceda, 2013), un inventario de emisiones es una compilación de datos de actividades emisoras y los contaminantes que emiten dichas actividades. Es una lista exhaustiva y ordenada que proporciona información sobre todas las fuentes de emisión y define la localización, frecuencia, magnitud, duración y contribución de estas emisiones (Carrillo Montero & González Valle, 2008).

Estos poseen una gran variedad de aplicaciones tanto por instituciones de carácter científico como político debido a que proporcionan la información básica que se necesita para llevar a cabo estudios ambientales referentes al cambio climático, la contaminación del aire, (Dios Noceda, 2013) permiten el análisis de alternativas para lograr mejoras de la calidad del aire, así como la evaluación de las concentraciones de contaminantes en zonas de interés.

En este estudio se ha realizado un inventario de emisiones basado en la utilización de factores de emisión, partiendo de las guías AP-42 (EPA, 2009b), EMEP/CORINAIR¹ (European Environment Agency, 2019) y la Guía de Inventario de Emisiones Atmosféricas de Chile (Escobar Melero et al., 2011). A su vez se ha estudiado la dispersión de los contaminantes en una mina de cobre en Chile en estado de explotación, realizando las simulaciones a través de la plataforma DMScloud de Meteosim SL a partir del modelo de dispersión CALPUFF.

1.6. Objetivo general.

El objetivo del presente trabajo es diagnosticar el impacto ambiental que diferentes actividades de explotación minera tienen sobre el entorno, lo que se ha intentado realizar de una forma lo más cercana a la realidad laboral posible, con el fin de lograr que sea similar a los estudios de impacto ambiental que la administración requiere a las empresas generadoras de inyección de contaminantes a la atmósfera.

¹ EMEP/CORINAIR: European Environment Agency/Coordination of environmental information on air emissions por sus siglas en Inglés.

Los objetivos específicos del trabajo han sido:

- 1- Identificar las principales actividades de una explotación minera que generan dispersión de PM_{10} y $PM_{2,5}$.
- 2- Calcular las emisiones de material particulado a partir de la obtención de los factores de emisión para cada una de las actividades generadoras de contaminantes a la atmósfera.
- 3- Simular, a partir de los resultados obtenidos, la dispersión de los contaminantes y la contribución de una explotación minera a la calidad del aire del entorno.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En el capítulo 2 se describe la zona de estudio y los materiales y métodos empleados para el desarrollo de este trabajo investigativo. En el primer apartado, se explica detalladamente la ubicación geográfica del área estudiada y las razones por las que se escogió para realizar esta investigación, además se hace la caracterización climática de la región, el análisis de la línea de base de la mina Sierra Miranda y un análisis meteorológico local para el período de 2017 al 2021, todo ello con el fin de lograr un mejor entendimiento de los resultados. En la segunda sección, se describe el proceso de investigación llevado a cabo, además de todos los cálculos y consideraciones realizadas para ejecutar la simulación de la dispersión de PM_{10} y $PM_{2,5}$ y de esta forma obtener los resultados finales del estudio.

2.1. Ubicación geográfica de la zona de estudio

El área de estudio se corresponde con la Mina Sierra Miranda, localizada en Chile, en la Región, Provincia y Comuna de Antofagasta. Limita aproximadamente a unos 25 km en dirección Noroeste con la empresa Minera Mantos Blancos, a 50 km al Noreste de la ciudad con el mismo nombre y a 20 km al Suroeste de Sierra Valenzuela. Dicho yacimiento minero se encuentra ubicado a $23^{\circ} 14' 14,02''$ de latitud Sur y $70^{\circ} 06' 49,33''$ de longitud Oeste a una altura de 1.400 metros sobre el nivel del mar.



Figura 5. Localización de la Mina Sierra Miranda. Fuente: Elaboración propia

Tal y como se ha comentado el objetivo principal del trabajo es el de diagnosticar el impacto ambiental que las actividades de una explotación minera tienen sobre el entorno. Para conseguir el citado objetivo, se ha seleccionado una explotación minera en Chile, por ser uno de los países con mayor desarrollo en dicho sector. La selección de la explotación minera se realizó teniendo en cuenta el poder contar con

información abierta y disponible de su actividad, imprescindible para el desarrollo del trabajo, lo que en este caso se ha conseguido a través del informe (Bordoli & Consultores Asociados E.I.R.L, 2012).

El proyecto “Mina Sierra Miranda” es un extenso yacimiento de cobre que comprende el método de explotación a cielo abierto. Inició su fase de explotación en enero del año 2021, y está concebido para un período de extracción de mineral de 3 años. En el presente trabajo se analizan las emisiones de los contaminantes PM₁₀ y PM_{2,5} en el año 2021 debido a que la mayor producción de minerales y estériles de la mina se encuentran planificadas para este período, siendo el peor escenario de contribución de fuentes contaminantes.

2.1.1. Características climáticas de la zona de estudio

En el yacimiento minero de Sierra Miranda predomina el clima desértico, caracterizado por una situación de extrema aridez y escasa vegetación, las precipitaciones son ínfimas y no sobrepasan los 100 mm anuales; además se caracteriza por la ausencia de humedad y la elevada sequedad atmosférica y amplitud térmica entre el día y la noche. Esta situación define un paisaje natural denominado Desierto de Atacama. La temperatura no es el factor más importante para determinar la vegetación en climas áridos; más bien, la sequedad lo es. La marcada aridez existente en esta zona no depende únicamente de la cantidad de lluvia que recibe, sino también de las pérdidas de agua del suelo por evaporación (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021).

La figura que se observa a continuación muestra el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones medias anuales en la Región de Antofagasta. En el área de Sierra Miranda, se aprecian variaciones de temperatura desde los 15,2°C a los 20,4°C y precipitaciones de 0mm a 11,2mm.

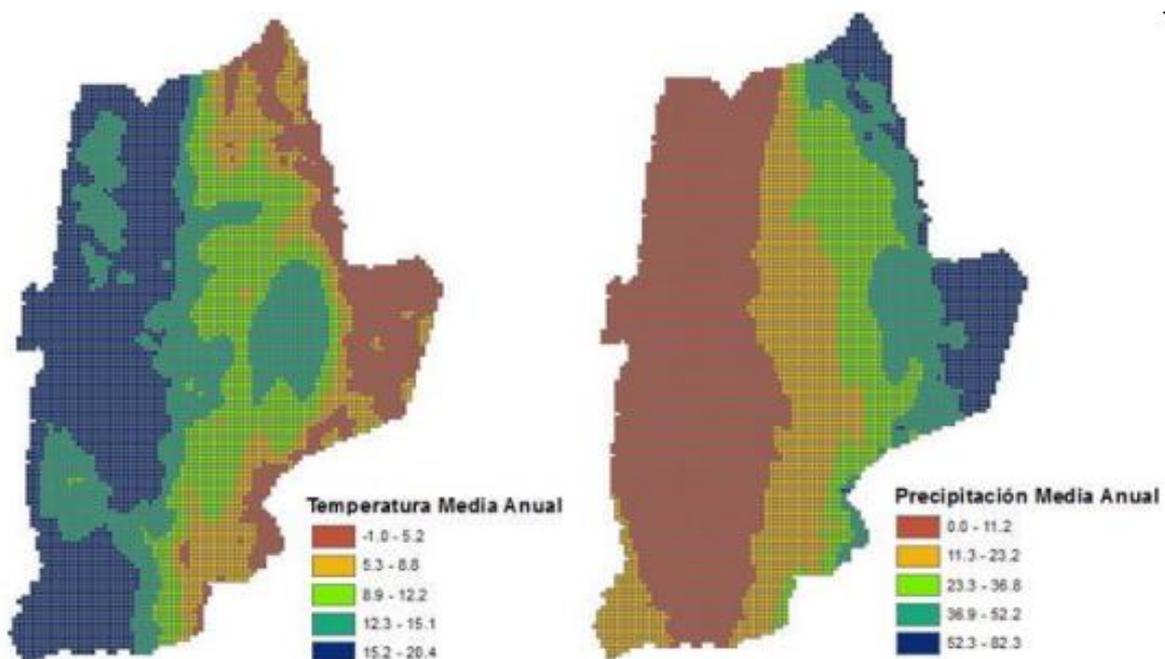


Figura 6. Variación de la precipitación y temperatura media anual en la Región de Antofagasta. Fuente:(CIREN, 2016)

2.1.2. Análisis de la línea de base de la calidad del aire en Mina Sierra Miranda

A continuación, se realiza un análisis del comportamiento de la calidad del aire para PM_{10} y $PM_{2,5}$ en la zona de estudio durante 5 años, en el período del 2017 al 2021, a partir de datos tomados del SINCA correspondiente a la estación de calidad del aire más cercana a la Mina Sierra Miranda, que en este caso es la Estación de Antofagasta ubicada a 61,7 km de distancia (Figura 7). Si bien es cierto que esta estación está bastante alejada del punto de interés y no se puede considerar del todo representativa, es la estación más cercana existente. Esto con el fin de analizar y comparar si las concentraciones de dichos contaminantes en ese intervalo de tiempo cumplen o no con lo establecido en la normativa de la calidad del aire vigente en Chile.

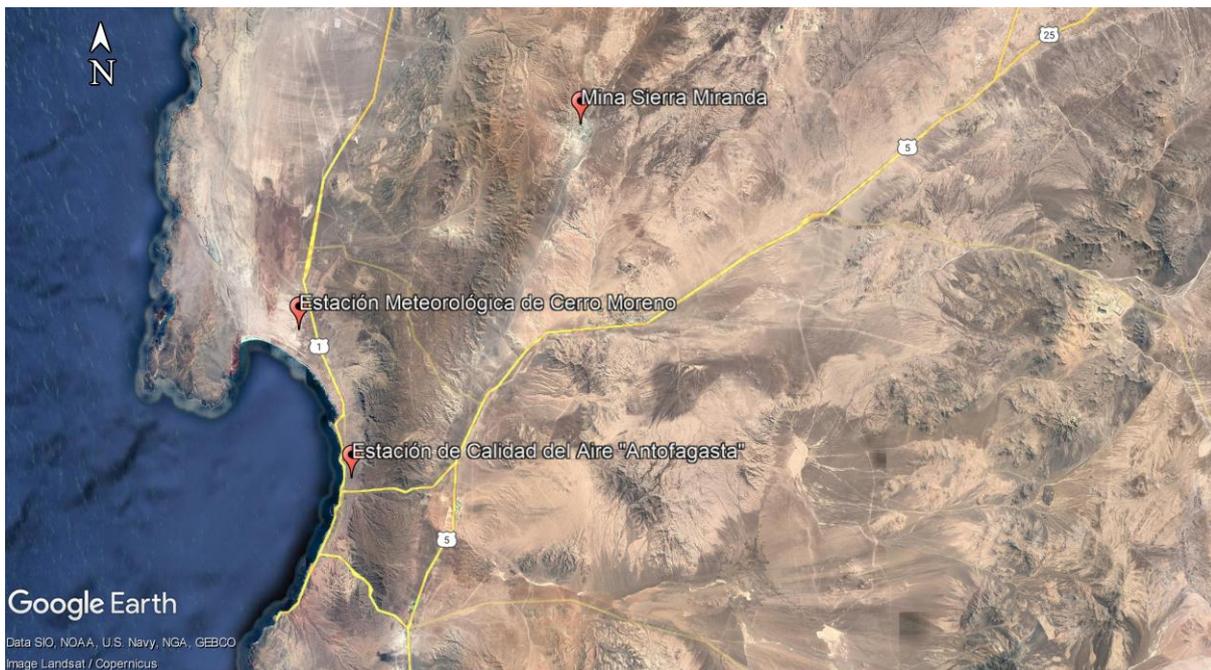


Figura 7. Mapa de localización de la Estación de Calidad del Aire "Antofagasta" y de la Estación Meteorológica de Cerro Moreno con respecto a Mina Sierra Miranda. Fuente: Imagen generada a través de Google Earth

En la figura 8 se observa el comportamiento diario del contaminante PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante los años 2017-2021. Al analizar el gráfico se aprecia que la concentración mínima es de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y ocurre en los meses de marzo y octubre del año 2020, mientras que la máxima concentración ocurre en junio del mismo año con un valor de $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por tanto, en este intervalo de tiempo no existen incumplimientos en cuanto a la concentración diaria que establece la normativa en Chile².

² La normativa anterior a 2022 para el contaminante PM_{10} establecía que se consideraba sobrepasada la norma cuando en un año el valor del percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas fuera mayor o igual a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por tanto, aunque algún valor en el período analizado hubiese superado los $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, realmente no hubiese significado una excedencia del valor límite.

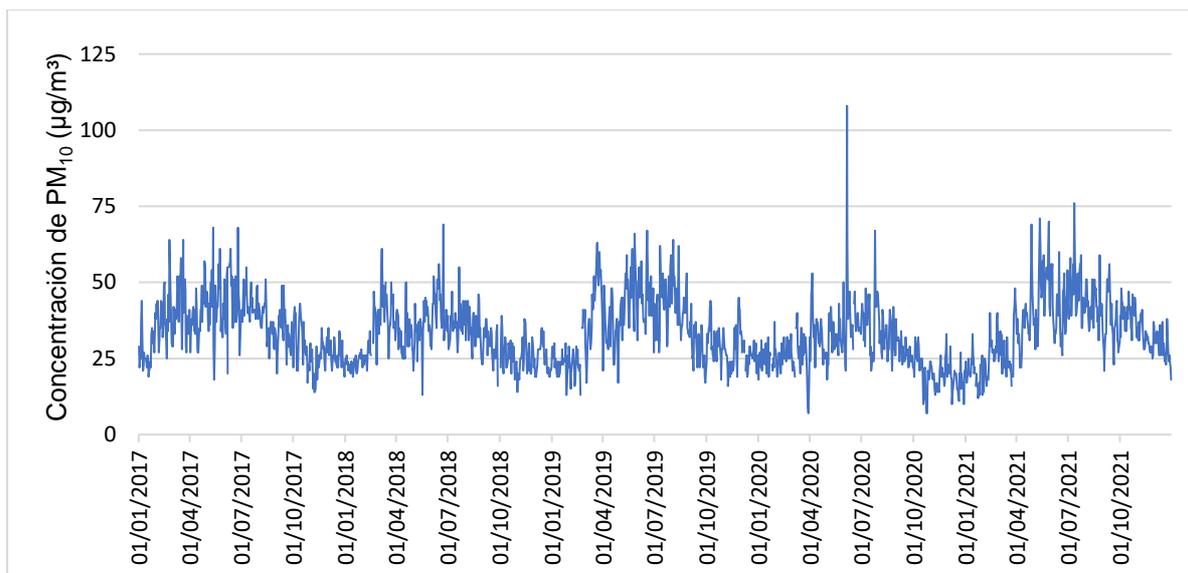


Figura 8. Comportamiento diario de la concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

La figura 9 muestra el comportamiento diario del contaminante $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el período del 2017-2021 donde se observa como el año 2017 los valores más bajos de contaminantes se sitúan en el mes de noviembre con un valor de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de los meses de enero, septiembre y octubre del mismo año, febrero del 2018 y el mes de noviembre del año 2020 con un valor de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las mayores concentraciones se observan en los meses de junio y julio de 2019 y 2021 respectivamente con $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el período analizado no se aprecian incumplimientos de la normativa primaria de la calidad del aire en Chile para la concentración diaria permitida.

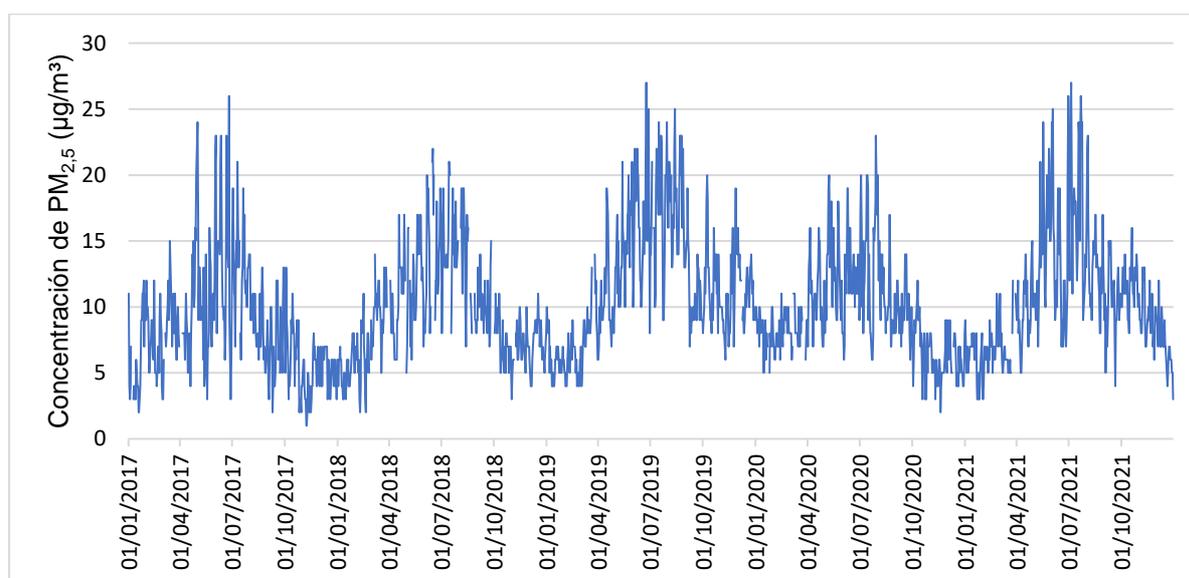


Figura 9. Comportamiento diario de la concentración de $PM_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la figura 10, se observan los valores promedios anuales para PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) donde se muestra que en el transcurso de los años analizados el máximo valor alcanzado fue de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aproximadamente y el mínimo de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que se cumple con lo estipulado en la normativa vigente para las concentraciones anuales permitidas.

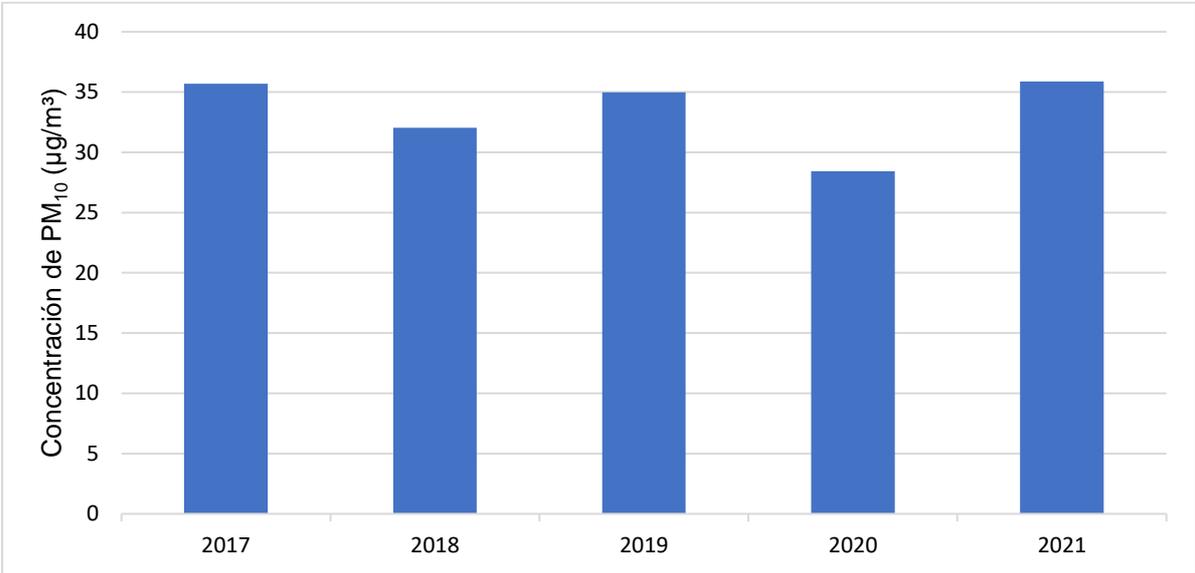


Figura 10. Valores promedios anuales de la concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

En el gráfico siguiente (véase Figura 11), se aprecia que las concentraciones mínimas y máximas de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para estos años es de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente por lo que cumple con la normativa establecida, de igual forma que los datos analizados anteriormente.

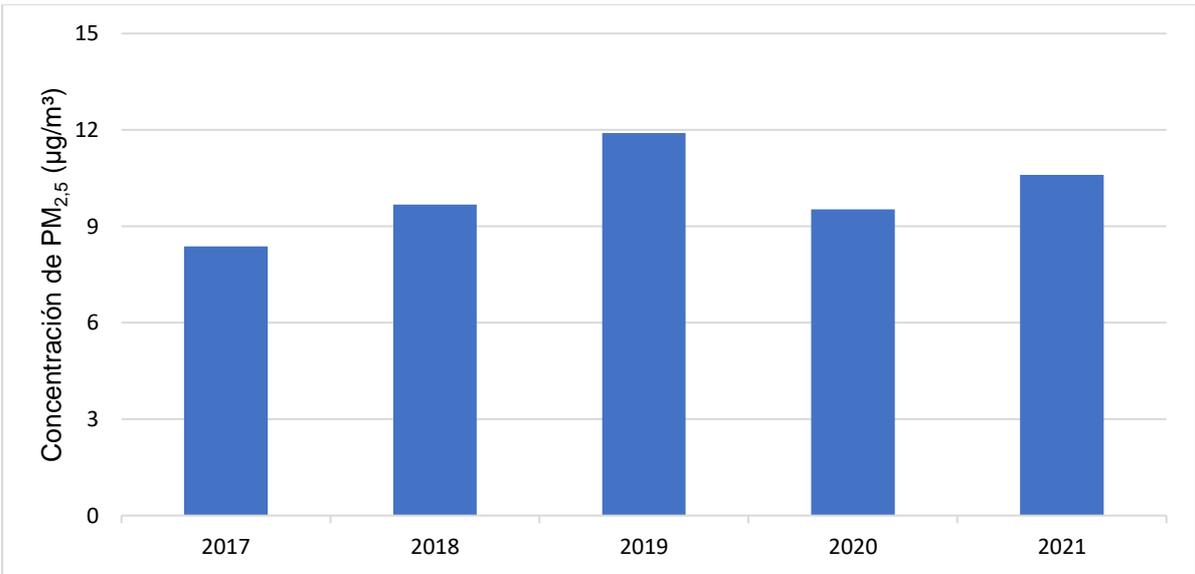


Figura 11. Valores promedios anuales de la concentración de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

2.1.3. Análisis meteorológico local

Según datos extraídos de (Dirección Meteorológica de Chile, 2022) correspondiente a la estación de Cerro Moreno en Antofagasta, ubicada a 42 km de distancia de la mina estudiada (Figura 7), se realiza un análisis del comportamiento de los principales parámetros meteorológicos de la localidad en el período del 2017 al 2021.

2.1.3.1. Velocidad del viento

En la figura 12 se observan los valores medios mensuales de la velocidad del viento para los 5 años analizados. Los valores mínimos oscilan entre los 11,8 km/h y 12,9 km/h en el mes de junio de 2021 y 2017 respectivamente. La velocidad del viento tiende a disminuir en los meses de mayo, junio y julio para cada uno de los años. Las máximas velocidades se observan en los meses de octubre del año 2019 y noviembre del 2020 con valores de 18,9 km/h y 18,1 km/h con una tendencia al aumento en los meses de octubre a enero.

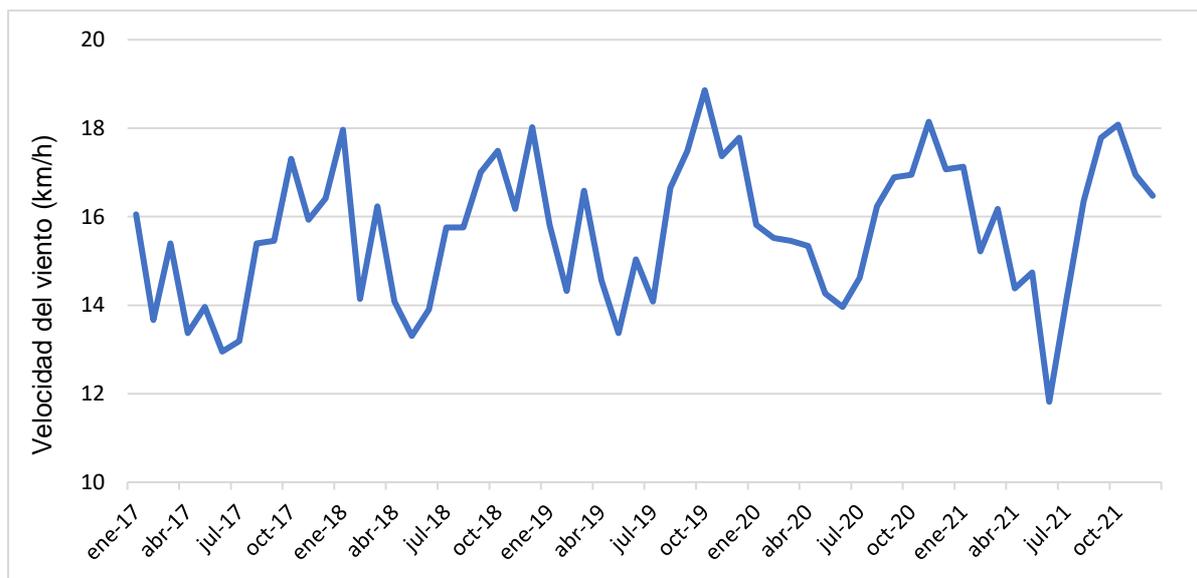


Figura 12. Comportamiento de la velocidad del viento media mensual (km/h) en el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

En el gráfico que se muestra a continuación (figura 13) se observa claramente que el comportamiento de la velocidad media anual del viento (km/h) es prácticamente constante para el período de 2017-2021, siendo el valor mínimo 14,9 km/h en el año 2017 y el máximo 16 km/h en 2019.

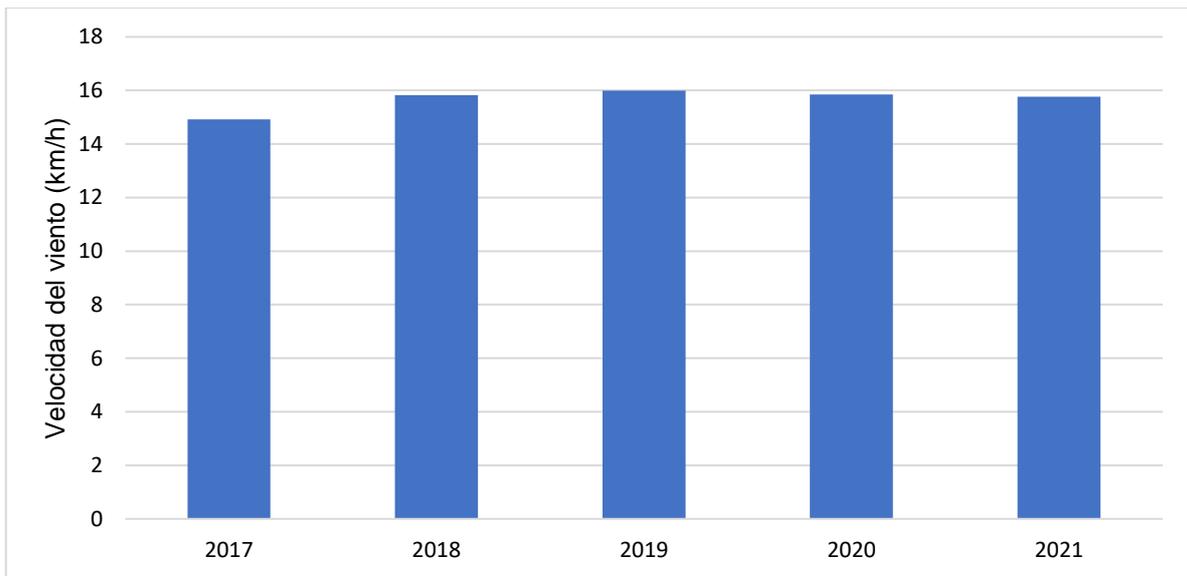


Figura 13. Evolución anual del viento medio (km/h). Fuente: Elaboración propia

La figura 14 muestra la rosa de los vientos para los años 2017 al 2021, donde se nota claramente que la dirección de los vientos que predomina es sur-suroeste en cada uno de los años. Los rangos de los valores de intensidad, expresados en nudos, poseen un comportamiento similar; las velocidades más comunes oscilan entre los 9,3 km/h y 27,8 km/h. Para convertir los valores expresados en nudos a kilómetros por hora se tuvo en cuenta la siguiente equivalencia: 1 nudo (kt) equivale a 1,85 km/h.

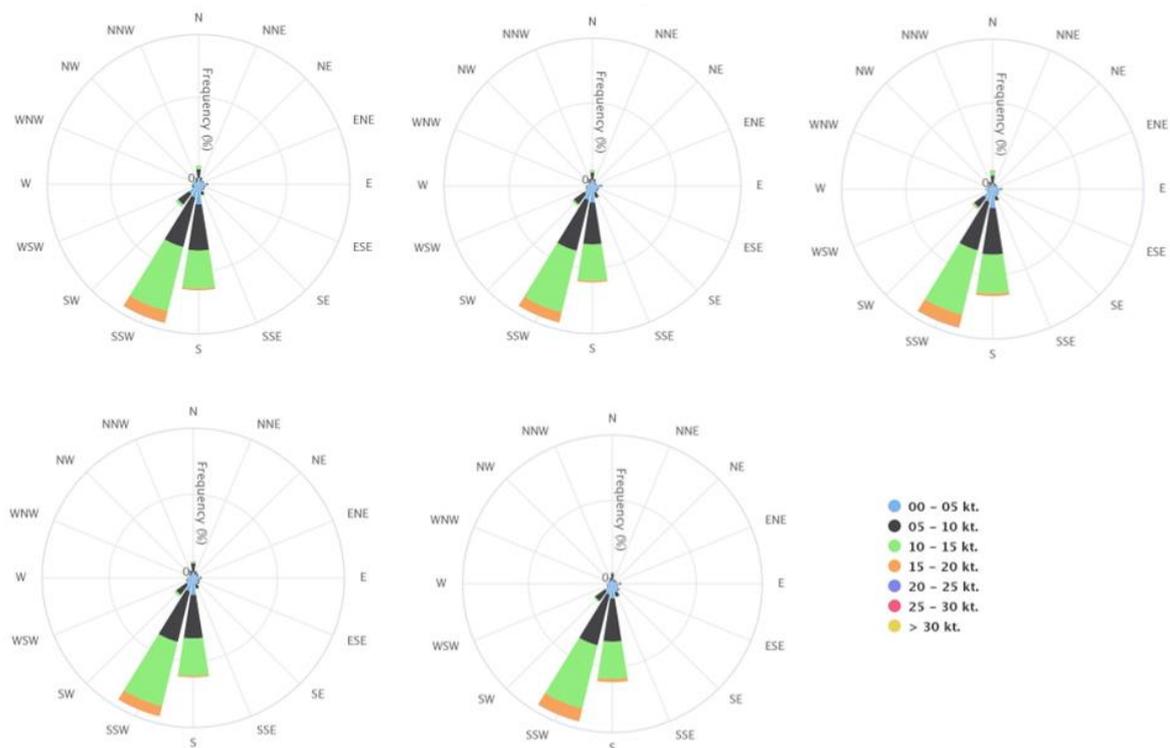


Figura 14. Dirección predominante y rangos de intensidad en nudos (kt) para los años 2017,2018,2019,2020 y 2021 siguiendo el mismo orden de la figura. Fuente: (Dirección Meteorológica de Chile, 2022)

A partir de información extraída del Explorador Eólico de Chile (Ministerio de Energía, 2022), se muestra en la figura 15 el comportamiento del ciclo diario anual del viento (m/s) en la ubicación de Mina Sierra Miranda. Se debe aclarar que la información que se muestra a continuación es información de modelo, no de observación, correspondiente al año 2015.

Nótese que en los meses desde octubre hasta marzo en el horario de las 14 a las 18 horas, existe predominio de las mayores velocidades del viento ocurridas en el año con velocidades de 9 a 10 m/s, siendo el mes de febrero el de mayor intensidad, mientras que el mínimo valor de velocidad del viento se observa en el mes de abril a las 20 horas. Tal y como se puede apreciar, la velocidad del viento durante todo el año tiende a aumentar en el horario de las 12 a las 19 horas.

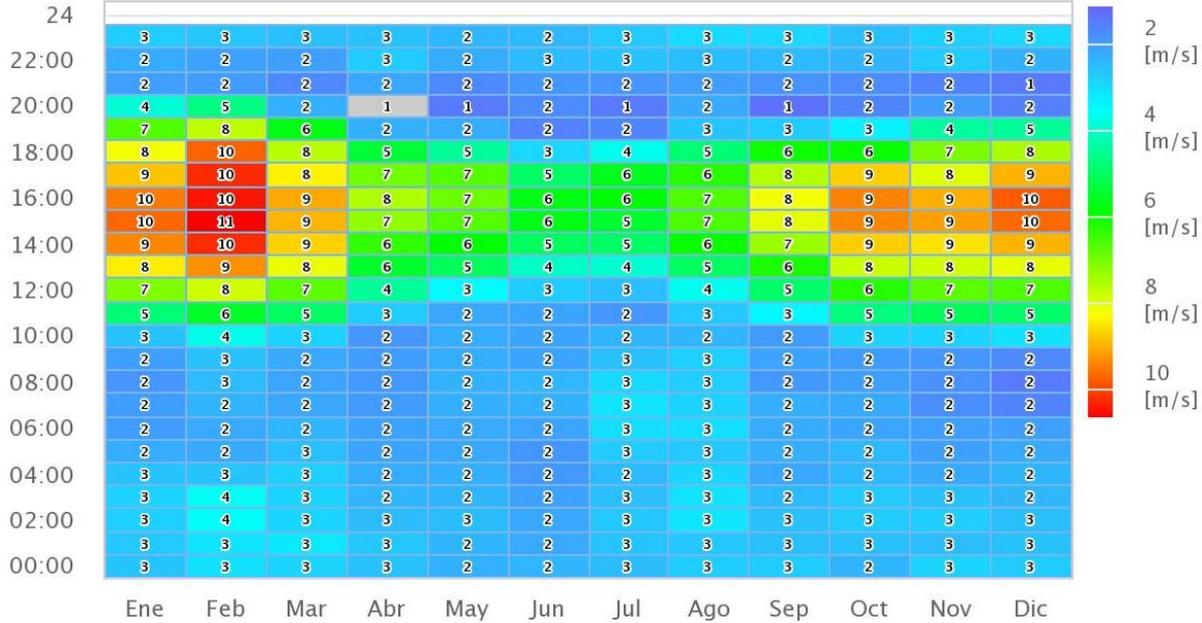


Figura 15. Ciclo diario anual del viento (m/s) en Mina Sierra Miranda. Fuente: (Ministerio de Energía, 2022)

Para conocer el comportamiento de los vientos en la zona de estudio, se muestra la rosa de los vientos (figura 16), generada mediante el modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model), trabajando a 3 km de resolución horizontal. A partir del análisis realizado se puede observar que la dirección predominante en el área de interés son los vientos que se mueven del noreste hacia el suroeste, siendo la dirección nornoreste y oeste noroeste la segunda y tercera dirección predominante respectivamente.

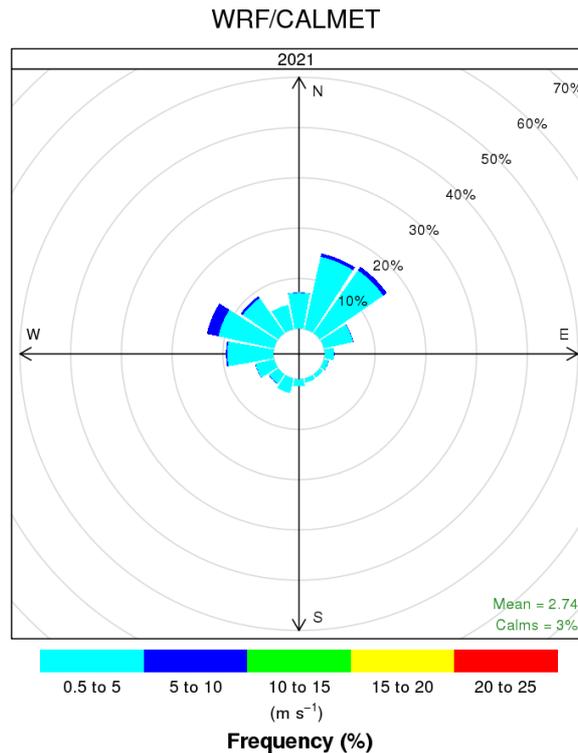


Figura 16. Dirección predominante y rangos de intensidad del viento en m/s en Mina Sierra Miranda
Fuente: Imagen proporcionada por Meteosim SL

2.1.3.2. Temperaturas

Al realizar el análisis de las temperaturas mínimas, medias y máximas mensuales se obtuvo el gráfico que se muestra a continuación (figura 17). Dicho gráfico permite interpretar que, en los meses desde mayo hasta agosto correspondientes al invierno, en el hemisferio Sur, de cada uno de los años analizados, las temperaturas tienden a disminuir, siendo el mes de julio del año 2021 el que posee la menor temperatura media registrada con una mínima de 11,9 °C, una media de 13,4°C y una máxima de 14,7°C. Las temperaturas medias mensuales más elevadas corresponden a los meses de enero y febrero del año 2017, perteneciendo al mes de enero la temperatura máxima con 24,6°C, una media de 22,3 °C y una mínima de 19,4°C, debido a la influencia del fenómeno meteorológico conocido como “El Niño Costero”³, que produjo un incremento importante en las temperaturas tanto máximas como mínimas en la costa norte de Chile durante este año (Vicencio & Campos, 2019). Al analizar el gráfico se puede apreciar que las temperaturas tienden al ascenso durante estos meses en cada año, debido a la estación del verano en el hemisferio Sur.

³ La Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se refiere a “El Niño Costero” cuando la temperatura superficial del mar trimestral en la región de la costa norte sudamericana excede su promedio en más de 0,4°C por tres o más meses consecutivos (Martínez Grimaldo & Takahashi, 2017) y (Vicencio & Campos, 2019).

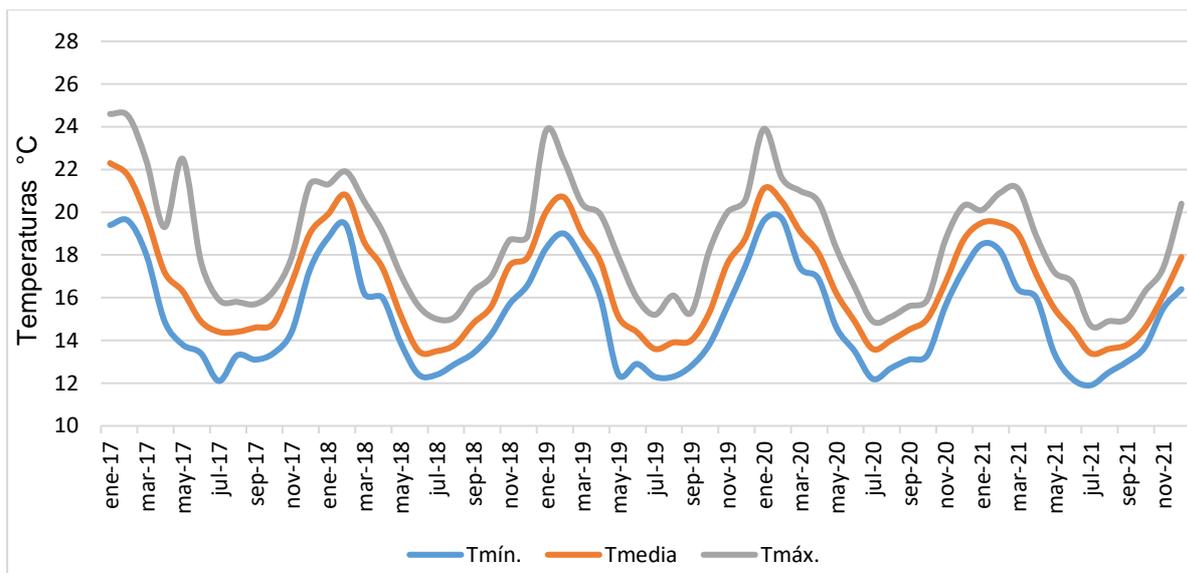


Figura 17. Evolución de los valores mínimos, medios y máximos mensuales de temperatura (°C) para el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

En la figura 18 se muestra que el comportamiento de los valores medios anuales de la temperatura en estos años se mantiene prácticamente sin variaciones importantes, siendo el año 2017 el que posee el mayor valor con 17,2 °C y para el resto de los años, se observa una disminución de la temperatura media anual, correspondiéndole el menor valor al año 2021 con 16,2 °C.

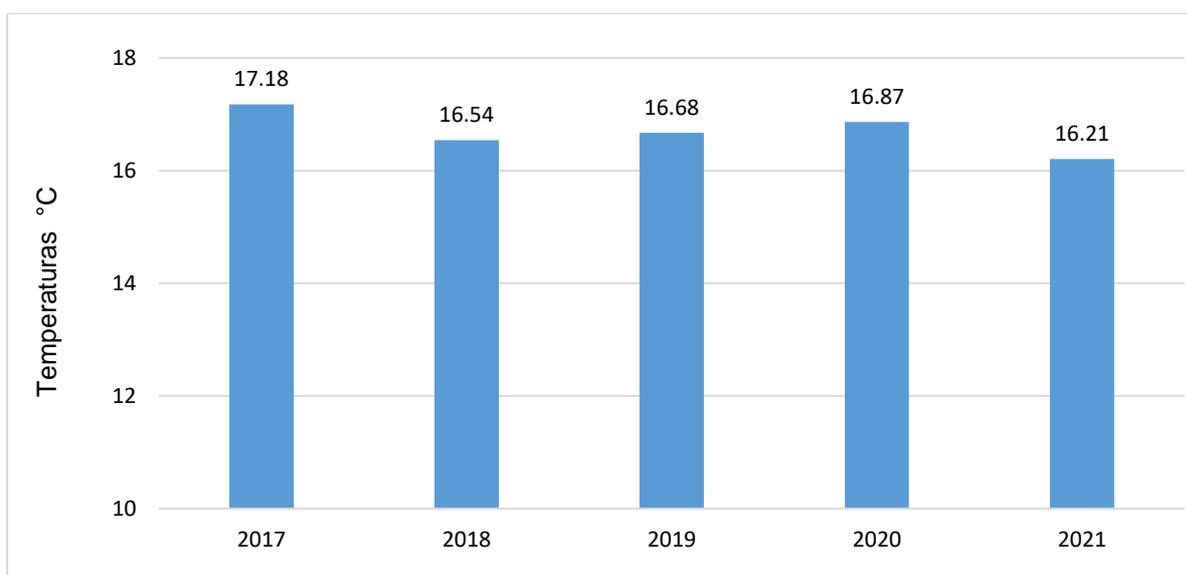


Figura 18. Valores medios anuales de temperatura (°C) para el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

2.1.3.3. Precipitaciones

Como se observa en la figura 19, las precipitaciones en la región estudiada son extremadamente escasas. El año 2017 destaca por poseer las mayores precipitaciones del período estudiado con un valor de 20mm, lo cual se debe a la influencia del fenómeno meteorológico explicado anteriormente, que produjo un

incremento notable de las precipitaciones en dicho período (Vicencio & Campos, 2019) ; pero al analizar el resto de los años se ve claramente que las precipitaciones oscilan entre los 0,4mm y 3mm anuales, tal situación se debe al clima árido que caracteriza a esta zona de la nación chilena.

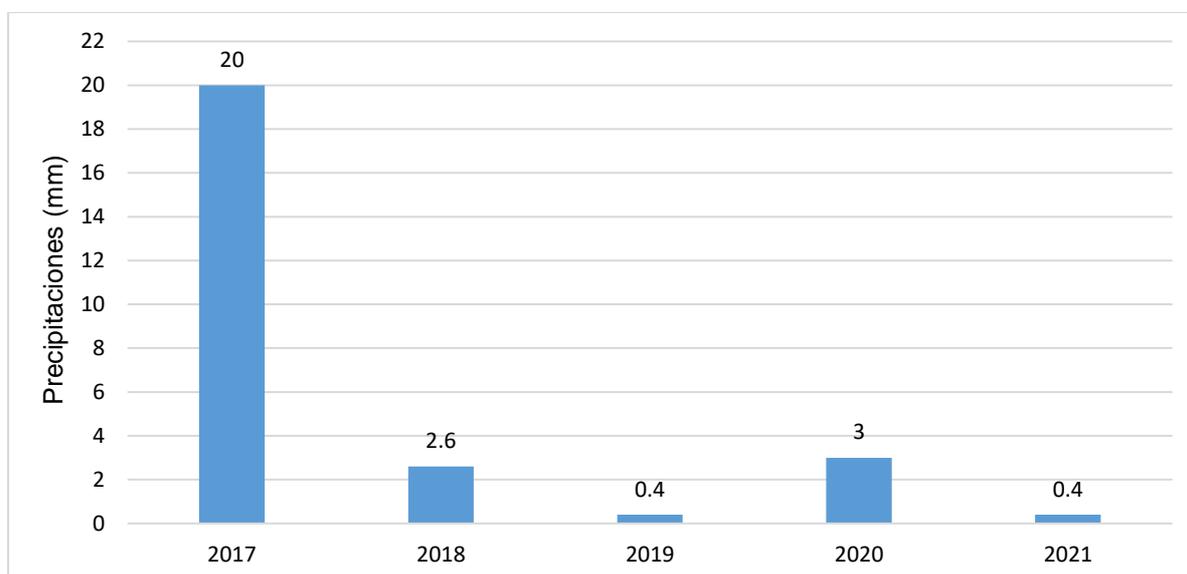


Figura 19. Valores anuales de las precipitaciones (mm) para el período de 2017-2021. Fuente: Elaboración propia

2.2. Cálculo del inventario de emisiones

Para realizar el inventario de emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la Mina Sierra Miranda, durante el año 2021, se llevó a cabo una ardua investigación con el fin de recopilar cierta información, imprescindible para la realización de dicho inventario. A partir del documento “Informe de emisiones: Proyecto de explotación Sector Simoide y Valentina Sur” (Bordoli & Consultores Asociados E.I.R.L, 2012) se ha conseguido extraer parte de los datos necesarios, mientras que, para la información no obtenida por revisión de esta documentación, se han adoptado una serie de consideraciones y aproximaciones. Los datos y cálculos realizados se procesaron con la ayuda de la hoja de cálculo (MS Excel), para visualizar dicho proceso remitirse a la sección de Anexos de este documento.

2.2.1. Identificación de las fuentes de emisión

En este estudio, solo se realiza el análisis de la etapa de explotación de la mina, por considerarse la más crítica en cuanto a dispersión de material particulado a la atmósfera, y por tanto la que mayor concentración genera, pues es la fase en la que se inyectan más contaminantes a la atmósfera por las actividades asociadas.

A continuación, se identifican las actividades generadoras de emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$:

- Perforación
- Tronaduras o voladuras
- Carga del mineral a la planta
- Carga del estéril al botadero
- Descarga del mineral en la planta

- Descarga del estéril en el botadero
- Circulación de los camiones cargados por caminos no pavimentados (Ruta de la Mina a la Planta)
- Circulación de los camiones cargados por caminos no pavimentados (Ruta de la Mina al Botadero)
- Circulación de los camiones vacíos por caminos no pavimentados (Ruta de la Planta a la Mina)
- Circulación de los camiones vacíos por caminos no pavimentados (Ruta del Botadero a la Mina)
- Nivelación
- Excavación
- Erosión eólica de las pilas de acopio de mineral y estéril
- Combustión de los motores de maquinarias y camiones utilizados tales como: camiones tipo dumper, perforadora, niveladora, excavadora y bulldozer.

2.2.2. Factores de emisión

Los factores de emisión (FE) corresponden a expresiones o ecuaciones matemáticas que permiten estimar tasas unitarias de emisiones atmosféricas. Los mismos, brindan un valor representativo de la cantidad de contaminantes por unidad de volumen, peso, distancia o duración de la actividad que se analice (Bordoli & Consultores Asociados E.I.R.L, 2012).

Para el análisis se adoptaron los factores de emisión recopilados en la Guía Metodológica de Inventario de Emisiones Atmosféricas de Chile (<https://mma.gob.cl/wpcontent/uploads/2017/12/GuiaMInventarioEmisionesAtmosfericas2011.pdf>) y el Manual AP-42, correspondientes a los propuestos por la Agencia de Protección del Ambiente de Estados Unidos, US EPA, por sus siglas en Inglés.

En la siguiente tabla se muestran las fórmulas utilizadas para el cálculo de los factores de emisión para cada fuente generadora de emisiones PM₁₀ y PM_{2.5} con su nomenclatura correspondiente.

Tabla 2: Factores de emisión de PM₁₀ y PM_{2.5}

Actividades	Factor de emisión	Variables	
		Descripción	Valor
Perforaciones	$F_e = 0,363$	F _e : factor de emisión para PM ₁₀ y PM _{2.5} (kg/perforación) Se considera como un valor fijo	F _e =0,363
Tronaduras o voladuras	$F_e = 0,0002 \times A^{1,5}$	F _e : factor de emisión (kg/tronaduras) A: área de la tronadura (m ²)	A=2000
Carga y descarga de material	$F_e = k \times 0,0016 \times \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}}$	F _e : factor de emisión, en kilogramos emitidos por cada tonelada de material transferido (kg/ton) K: Coeficiente del tamaño de partículas emitidas (adimensional) U: velocidad promedio del	K=0,35 para PM ₁₀ K=0,053 para PM _{2.5} U= 5,4 M=2,5

		viento (m/s) M: contenido de humedad del material (%)	
Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados	$F_e = k \times \left(\frac{s}{12}\right)^a \times \left(\frac{W}{3}\right)^b$	F _e : factor de emisión (lb/millas recorridas) k: factor de corrección por tamaño de partículas (adimensional) s: contenido de partículas finas en la superficie de la calle (%) a;b: constantes (adimensional) W: peso promedio de los vehículos (ton)	k=1,8 s = 10 a= 0,7 para PM ₁₀ a= 0,9 para PM _{2,5} b= 0,45 W= 174
Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados	$F_e = k \times \left(\frac{s}{12}\right)^a \times \left(\frac{W}{3}\right)^b$	F _e : factor de emisión (lb/millas recorridas) k: factor de corrección por tamaño de partículas (adimensional) s: contenido de partículas finas en la superficie de la calle (%) a;b: constantes (adimensional) W: peso promedio de los vehículos (ton)	k=1,8 s = 10 a= 0,7 para PM ₁₀ a= 0,9 para PM _{2,5} b= 0,45 W= 110
Nivelación	$F_e = 0,0056 \times k \times (S)^2$	S: velocidad media del vehículo (km/h) k: factor del tamaño de partícula (adimensional) F _e : factor de emisión (kg/km-vehículo)	S= 10 k=0,6 para PM ₁₀ k=0,031 para PM _{2,5}
Excavación	$F_e(PM_{10}) = 0,3375 \times \frac{(s)^{1,5}}{(M)^{1,4}}$ $F_e(PM_{2,5}) = 0,273 \times \frac{(s)^{1,2}}{(M)^{1,3}}$	s: porcentaje de finos (%) M: porcentaje de humedad del material (%)	s=10 M=2,5
Erosión eólica	$F_e = 1,9 \times \left(\frac{s}{1,5}\right) \left(\frac{f}{15}\right) \left(\frac{365 - p}{365}\right)$	F _e : factor de emisión, en kilogramos por día por cada hectárea de superficie activa s: contenido de finos del suelo o material apilado (%) f: porcentaje del tiempo en que el viento excede los 5,4 m/s a la altura media de la pila (%) p: número de días con precipitación igual o mayor que 0,254 mm	s= 10 f=10 p=0
Combustión motores camiones y maquinarias	F _e varía en dependencia del tipo de motor y contaminante	Ver valores en la tabla 3	

La tabla 3 posee los valores de los factores de emisión para cada tipo de vehículo y maquinarias empleadas. Para el caso de los vehículos con un motor de potencia superior a 600 hp, se utilizaron los factores de emisión de la sección 3.4 “Large Stationary Diesel and All Stationary Dual fuel Engines” y para el caso de los vehículos con potencia de hasta 600 hp se emplearon los factores de emisión del apartado 3.3 “Gasoline and Diesel Industrial Engines”, ambos de la Guía AP-42.

Tabla 3: Factores de emisión para PM₁₀ y PM_{2,5} según tipo de vehículo.

Tipo de equipo	Modelo	Potencia (kw)	Factor de emisión (kg/kw-hr) PM ₁₀	Factor de emisión (kg/kw-hr) PM _{2,5}
Perforadora	Sand 1500	261,1	0,0013	0,0013
Niveladora	Cat 14 H	179	0,0013	0,0013
Excavadora	Kom PC 2000	728,1	0,00043	0,00043
Bulldozer	Cat D8	261,1	0,0013	0,0013
Dumper	CAT 775F	552	0,00043	0,00043

2.2.3. Parámetros de cálculo

Con el objetivo de lograr un mayor entendimiento del trabajo realizado, en este apartado se muestran los datos y consideraciones técnicas realizadas para llevar a cabo el cálculo del inventario de emisiones a partir de las tablas 4,5 y 6.

Tabla 4: Datos operacionales de la Mina

Actividad	Cantidad	Unidad de medida
Perforaciones	32	pozos/día
Tronaduras o voladuras	1	tronada/día
Carga de mineral	2 190.000	ton/año
Descarga de mineral	2 190.000	ton/año
Carga de estéril	8 037.300	ton/año
Descarga de estéril	8 037.300	ton/año
Distancia de la Mina-Planta	0,61	km
Distancia de la Mina-Botadero	0,3	km
Área de acopio de mineral	12	ha
Área del botadero	18	ha
Área de perforación	602.762	m ²
Área total a tronar	73	ha

Tabla 5: Aspectos técnicos de los vehículos

Datos	Cantidad	Unidad de medida
Peso del camión cargado	174	ton
Peso del camión vacío	110	ton
Velocidad de circulación de los camiones cargados	35	km/h
Velocidad de circulación de los camiones vacíos	35	km/h
Capacidad de balde de la excavadora	3,5	m ³
Potencia nominal camión	552	kw
Potencia nominal excavadora	728,1	kw
Potencia nominal bulldozer	261,1	kw
Potencia nominal niveladora	179	kw
Potencia nominal perforadora	261,1	kw
Densidad del suelo a perforar y tronar	2,5	ton/m ³
Densidad del material tronado	2	ton/m ³

Tabla 6: Características técnicas de interés

Tipo	Cantidad	Características
Dumper CAT 775F	5	Capacidad de carga: 64 ton Peso del camión: 110 ton
Perforadora Sand 1500	2	-----
Niveladora Cat 14 H	1	Anchura de la hoja: 4,2 m
Bulldozer Cat D8	1	-----
Excavadora Kom PC 2000	1	Capacidad de Balde: 3,5 ton

Como se ha explicado anteriormente, para realizar el inventario de emisiones se han debido realizar una serie de consideraciones y aproximaciones que a continuación se indican. Este tipo de asunciones es algo habitual cuando no se dispone de información o no se puede acceder a información directamente proporcionada por el propietario de la explotación minera.

- 1- Se ha considerado que la mina trabaja durante los 365 días del año con una jornada laboral de 12 horas al día.
- 2- Para la nivelación se consideró que la velocidad media con que opera la niveladora es de 10 km/h. Además, se calculó la distancia recorrida por esta, siendo de 66.612 km al año, teniendo en cuenta la anchura de la hoja, el número de pases, que para este caso se adoptó 2 pases por cada capa y 18.250 barridos de 365.000 ml.
- 3- Se asumió que para cada vehículo los tiempos de operación serían de 12 h/día.
- 4- Teniendo en cuenta la cantidad de material (estéril y mineral) transportado durante el año analizado, la capacidad de carga de los camiones y la cantidad de días que trabaja la mina, se calculó el flujo de los vehículos, siendo 94 viajes a la planta y 344 viajes al botadero por cada dumper, en el período de un año.
- 5- Los datos correspondientes al número de días con precipitaciones mayores de 0,25 mm ($d=0\text{mm}$) se obtuvieron de la página oficial de la Dirección Meteorológica de Chile para la estación de Cerro Moreno en Antofagasta.
- 6- Se consideró que $C=1\%$ (factor de carga de los equipos).
- 7- Se calculó el área total a tronar siendo igual a 73 ha.
- 8- Se considera un 25% del área de tronaduras como área de carga de mineral y estéril equivalente a 182.500 m².
- 9- Con respecto a los tiempos y horarios de ejecución de cada actividad se asumió que la excavación se realizaría desde las 13 a las 21 horas al día durante los 365 días del año; que la nivelación se realizaría en los meses de marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre desde las 9 hasta las 21 horas al día.
- 10- Se asumió para el caso de las tronaduras y las perforaciones, que se realizan 32 perforaciones al día en el horario de las 9 a las 12 horas (11.680 perforaciones al año) y 1 tronadura diaria en el horario de las 12 horas, durante los 365 días del año 2021 (365 tronaduras al año).

2.2.4. Emisiones del material particulado

Para efectuar el cálculo de las emisiones de PM₁₀ y PM_{2,5} se emplearon las expresiones matemáticas que se presentan en la tabla 7.

Tabla 7: Expresiones para el cálculo de las emisiones de material particulado

Actividades	Emisión	Descripción
Perforaciones	$E = F_e \times Q$	F _e : factor de emisión (kg/perforación) Q: cantidad de perforaciones al día (perforaciones/día) E: emisiones (kg/año)
Tronaduras o voladuras	$E = F_e \times N_a$	F _e : factor de emisión (kg/tronaduras) N _a : número de tronadas/año E: emisiones (kg/año)
Carga y descarga de material	$E = F_e \times N_a$	F _e : factor de emisión, en kilogramos emitidos por cada tonelada de material transferido (kg/ton) N _a : cantidad de material cargado (ton/año) E: emisiones (kg/año)
Circulación de camiones cargados y vacíos por caminos no pavimentados	$E_{\text{anual}} = F_e \times F \times L \times (365 - d)$	F _e : factor de emisión de partículas por calle (gr/vehículo-km) F: Flujo vehículo diario (vehículo/día) L: longitud del tramo (km) d: número de días con precipitaciones mayores de 0,25mm E _{anual} : emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar (g/año)
Nivelación	$E = F_e \times d$	F _e : factor de emisión (kg/km-vehículo) d: distancia recorrida (km/año) E: emisión (kg/año)
Excavación	$E = F_e \times t$	F _e : factor de emisión (kg/h) t= tiempo de operación (horas) E= emisiones (kg/día)
Erosión Eólica	$E = F_e \times A_m$	F _e =Factor de emisión de superficie activa (kg-día/ha) A _m : Área expuesta (ha) E: emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar (kg/día)
Combustión motores camiones y maquinarias	$E = F_e \times C \times T \times W$	E: emisiones del contaminante i producidas por un vehículo tipo k (kg/día) C: factor de carga (%) T: tiempo de operación promedio de los vehículos del tipo k (horas) W: potencia nominal (kw)

2.3. Modelo de calidad del aire utilizado. Simulación de contaminantes

La simulación de la dispersión de contaminantes estudiados se llevó a cabo empleando la Plataforma DMScloud de Meteosim SL.

Meteosim SL es una empresa que brinda una serie de servicios meteorológicos y ambientales y posee una elevada experiencia utilizando herramientas de modelización numérica. Entre los modelos de dispersión de contaminantes a la atmósfera que utilizan se encuentran AERMOD y CALPUFF. Ambos modelos permiten realizar simulaciones de las condiciones químicas y físicas que afectan el proceso de dispersión de cualquier contaminante atmosférico y se caracterizan por precisar de datos meteorológicos para lograr una óptima ejecución (Meteosim SL, 2003)

AERMOD es un modelo de dispersión gaussiano en estado estacionario. Dicho modelo asume que la propagación promediada en el tiempo de los contaminantes produce una distribución normal (gausiana) de las concentraciones de los mismos, tanto horizontal como verticalmente a través de la pluma contaminante. AERMOD es empleado para zonas de topografía simple, la existencia de condiciones meteorológicas homogéneas, el transporte constante en dirección horizontal y además ignora los cambios de la dirección del viento con la altura (Trinity Consultants, 2020).

Chile es una zona de topografía compleja y por tanto el modelo gaussiano simple no funciona del todo bien, pues dicho modelo lo que tiene en cuenta son los campos homogéneos de la meteorología, por lo que el campo de los vientos no es heterogéneo, o sea, no varía en el espacio.

Por tales motivos se seleccionó el modelo CALPUFF para el desarrollo de las simulaciones. En el apartado siguiente se explican las características de dicho modelo por las cuales ha sido empleado.

2.3.1. Modelo CALPUFF

El modelo de dispersión de contaminantes CALPUFF, es un modelo no estacionario, de dispersión *puff* Gaussiano Lagrangiano, capaz de simular la distribución espacial de varios contaminantes en forma simultánea, a medida que son transportados, modificados por reacciones químicas y depositados en la superficie (Jorquera H., 2012).

Dicho modelo se desarrolló a finales de los ochenta y tiene la capacidad de asimilar datos meteorológicos complejos, de variación espacial tanto en la superficie como en niveles superiores, además es capaz de realizar los cálculos para múltiples especies contaminantes en simultáneo. La dispersión de los contaminantes es modelada teniendo en cuenta el terreno complejo, el transporte sobre el agua, los efectos de interacción costera, el efecto aerodinámico de los edificios (*building downwash*), remoción seca y húmeda, y transformaciones químicas simples (Scire et al., 2000).

2.3.2. Simulación de contaminantes

A partir de las fórmulas antes expuestas, se realizaron los cálculos correspondientes con el objetivo de efectuar la simulación de PM_{10} y $PM_{2,5}$ a través de la plataforma que se ha explicado.

Para la simulación fue necesario crear un kml por cada actividad minera identificada como generadora de material particulado, a partir de Google Earth Pro, con el fin de obtener las coordenadas de cada fuente contaminante, ya fuera fuente de área o fuente lineal.

Las fuentes de áreas corresponden a las áreas de acopio de mineral y estéril, a las áreas de carga y descarga de ambos materiales y a las áreas destinadas para las actividades de perforación, tronaduras, nivelación y excavación. Por otra parte, las fuentes lineales se refieren a las rutas de transporte de materiales existentes en la mina, o sea, las carreteras sin pavimentar que conectan a la mina con la planta y a la mina con el botadero de estériles⁴.

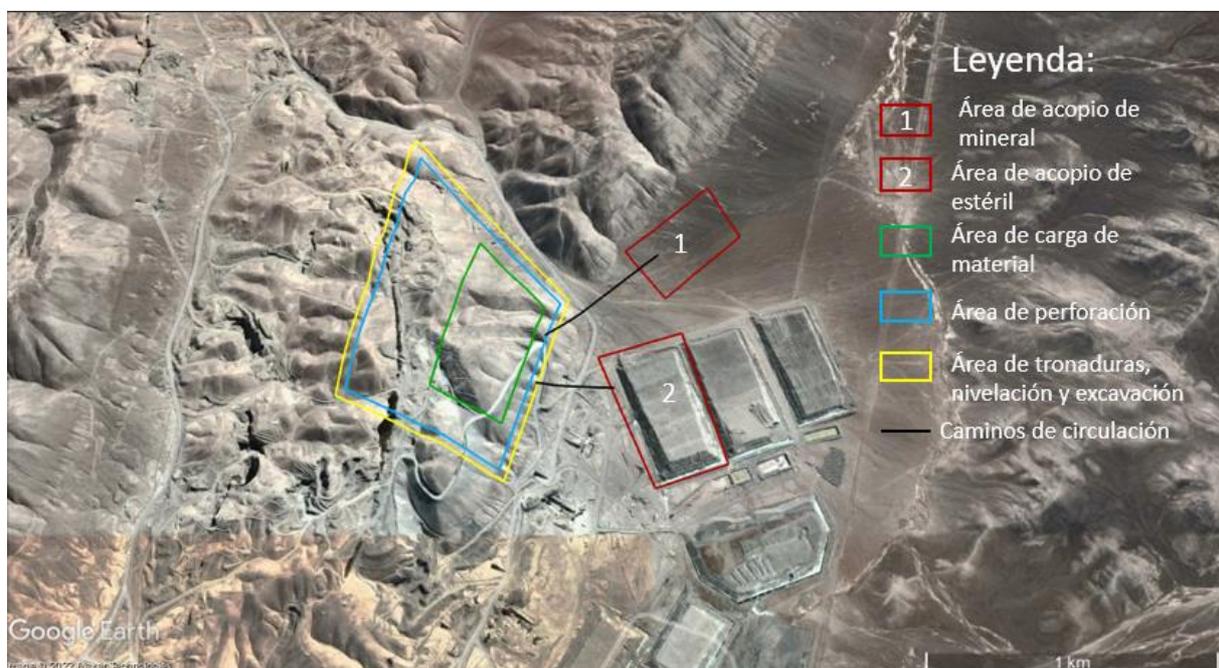


Figura 20. Ubicación en la mina de cada fuente de emisión. Fuente: Elaboración propia

Se determinó el dominio de la simulación de 40km x 40km con una malla de resolución de 1km. En la figura 21 se muestra dicha malla, donde los puntos azules representan los puntos receptores y el punto rojo la ubicación de la mina.

⁴ En algunos casos, debido a la falta de información disponible, se debió definir las áreas de trabajo que definían las fuentes de contaminantes. Si bien es cierto que es una aproximación, se ha considerado que no afecta al objetivo intrínseco del trabajo, que no es otro que ser capaz de modelizar y analizar la dispersión de contaminantes en la atmósfera asociada a una explotación minera.

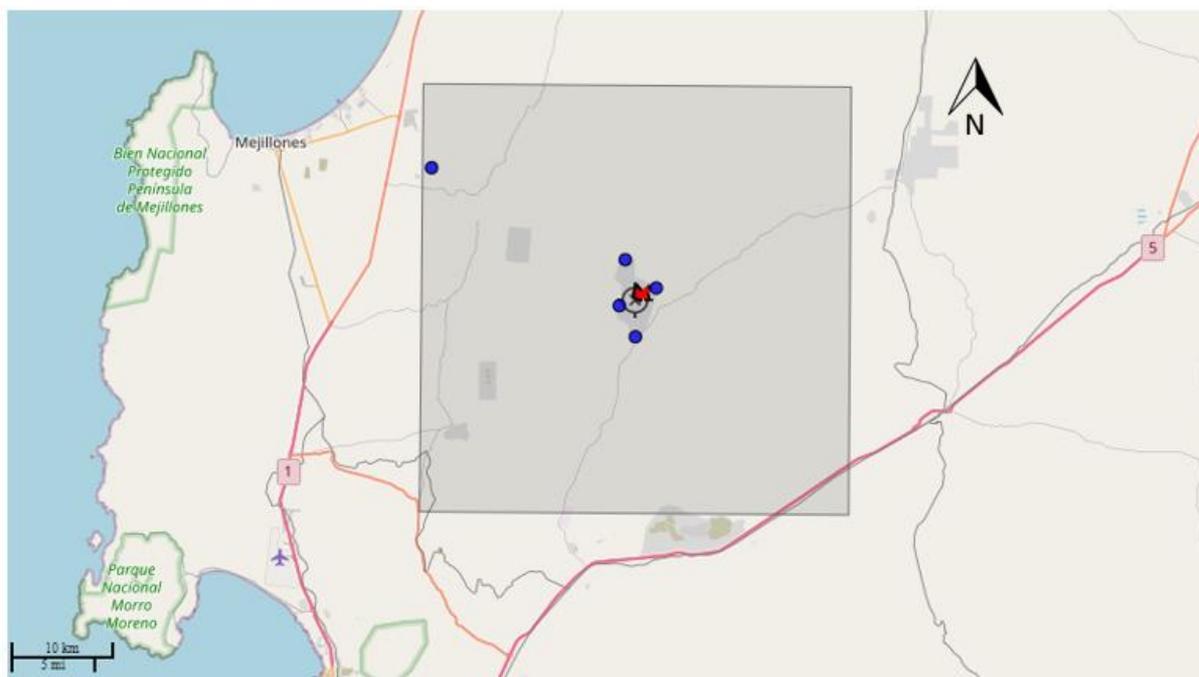


Figura 21. Malla de resolución 1km definida para la simulación. Fuente: Imagen proporcionada por Meteosim SL

Posteriormente se introdujeron las emisiones calculadas para cada fuente de contaminación y a cada emisión se le asignó un perfil de emisión para la simulación del modelo de dispersión. A continuación, se muestran los 5 perfiles de emisión creados teniendo en cuenta las consideraciones tomadas con respecto a los tiempos de trabajo y su correspondencia con las fuentes de emisiones.

Tabla 8: Perfiles de emisión.

Perfiles asignados	Tipo	Descripción
PFL 01	Diurno	24 horas al día
PFL 02	Diurno	13-21 horas
PFL 03	Diurno	Solo a las 12 horas
PFL 04	Mensual	5 meses
PFL 05	Diurno	9-12 horas

Tabla 9: Correspondencia entre las fuentes de emisión y los perfiles asignados.

Tipo de fuentes	Actividades	Perfiles asignados
Fuentes de área	Perforación	PFL 05
	Tronaduras	PFL 03
	Nivelación	PFL 04
	Excavación	PFL 02
	Carga de estéril al botadero	PFL 02
	Descarga de estéril en botadero	PFL 02
	Carga de mineral a la planta	PFL 02
	Descarga de mineral en la planta	PFL 02
	Acopio de estéril	PFL 01
	Acopio de minerales	PFL 01
Fuentes de área consideradas para el cálculo de contaminantes debido al tubo de escape	Área de operación del Bulldozer	PFL 02
	Área de operación de la Excavadora	PFL 02
	Área de operación de la Niveladora	PFL 04
	Área de operación de la Perforadora	PFL 05
Fuentes lineales	Ruta de mina -botadero (camiones cargados)	PFL 02
	Ruta del botadero-mina (camiones vacíos)	PFL 02
	Ruta de mina-planta (camiones cargados)	PFL 02
	Ruta de planta -mina (camiones vacíos)	PFL 02
Fuentes lineales consideradas para el cálculo de contaminantes debido al tubo de escape	Dumper ida al botadero	PFL 02
	Dumper regreso a la mina	PFL 02
	Dumper ida a la planta	PFL 02
	Dumper regreso a la mina	PFL 02

Finalmente se introducen los datos para el postprocesado. Se ha trabajado con el percentil 98 porque es el que permite realizar una comparación directa con la norma vigente en Chile (que permite la superación de valores diarios de PM₁₀ y PM_{2,5} hasta en 7 ocasiones). Además, se consideran 5 receptores ubicados a cierta distancia de la mina. Dichos receptores fueron tomados en puntos que no se consideran realmente sensibles debido a que la mina se encuentra alejada de las zonas urbanas, pero se hace necesario para el análisis de la contaminación producto de esta.

Tabla 10: Ubicación de los receptores a partir de sus coordenadas UTM obtenidas utilizando el Datum WGS-84 y huso geográfico 19 K

N.º	Receptores	UTMx (m)	UTMy (m)
1	Sur	385890	7426601
2	Norte	384890	7433801
3	Este	387800	7431180
4	Oeste	384370	7429500
5	Central Térmica Andino	366730	7442250

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las expresiones matemáticas definidas en el capítulo 2, para el cálculo de los factores de emisión y de las emisiones totales correspondientes a cada actividad. Teniendo en cuenta esto, se identifican las principales fuentes de contribución de material particulado en la explotación minera analizada. Además, se muestran los datos de salida del modelo de calidad del aire utilizado, permitiendo determinar las contribuciones a los niveles de calidad del aire del entorno y comparar los resultados con la normativa vigente en Chile.

3.1. Resultados obtenidos del inventario de emisiones de PM₁₀ y PM_{2,5} para las fuentes estudiadas

Como se ha planteado en el capítulo anterior, las emisiones de PM₁₀ y PM_{2,5} de cada actividad estudiada, se obtienen multiplicando los factores de emisión correspondientes (Tabla 2) por los niveles de actividad y por el tiempo en que se desarrolla dicha actividad. Los resultados obtenidos del cálculo de los factores de emisión para PM₁₀ y de las emisiones de material particulado correspondiente a cada actividad se muestran en la tabla 11.

Tabla 11: Inventario de emisiones para PM₁₀.

Inventario de Emisiones para PM ₁₀				
Actividad generadora	Factor de emisión	Unidades	Emisión	Unidades
Perforaciones	0,363	kg/perforación	4.239,84	kg/año
Voladuras o tronaduras	19,68	kg/tronada	7.182,3	kg/año
Carga de estéril al botadero	0,0013	kg/ton	10.582,45	kg/año
Descarga de estéril en botadero	0,0013	kg/ton	10.582,45	kg/año
Carga de mineral a la planta	0,0013	kg/ton	2.883,50	kg/año
Descarga de mineral en la planta	0,0013	kg/ton	2.883,50	kg/año
Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados (ruta de mina-botadero)	9,85	lb/millas recorridas	104.582,08	kg/año
Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta del botadero-mina)	8,012	lb/millas recorridas	85.081,83	kg/año
Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados (ruta de mina-planta)	9,85	lb/millas recorridas	57.942,84	kg/año
Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta de planta-mina)	8,012	lb/millas recorridas	47.138,89	kg/año
Nivelación	0,336	kg/km-año	22.381,63	kg/año
Excavación	2,959	kg/hrs	8.640,53	kg/año
Erosión eólica	8,444	kg-día/ha	92.466,67	kg/año
Dumper	0,00043	kg/kw-hr	10,396	kg/año
Bulldozer	0,0013	kg/kw-hr	14,867	kg/año
Excavadora	0,00043	kg/kw-hr	13,713	kg/año
Niveladora	0,0013	kg/kw-hr	4,189	kg/año
Perforadora	0,0013	kg/kw-hr	14,867	kg/año

Para analizar con mayor facilidad las contribuciones de PM₁₀ por actividad, se realizó el gráfico representado en la figura 22. Se aprecia claramente que las actividades de transporte de material por caminos no pavimentados son las que presentan, en general, mayores emisiones de PM₁₀ al aire, siendo predominante la transportación de estériles de la mina al botadero con un valor de emisión de 104.582 kg/año; lo que puede fundamentarse con que la cantidad de estéril transportado en el período de estudio representa casi el 80% del material total transportado, por lo que el número de viajes de la mina al botadero es mucho mayor que a la planta. Luego le siguen la erosión eólica con un valor de emisión de 92.466 kg/año, la nivelación con valor de 22.381 kg/año y las actividades de carga y descarga de estériles con 10.582 kg/año. Por otra parte, las menores contribuciones del contaminante estuvieron dadas por las emisiones del tubo de escape de las maquinarias empleadas en la mina, siendo la más pequeña la de la niveladora con un valor de 4 kg/año. Seguido a las contribuciones por el tubo de escape, se encuentran las actividades de carga y descarga de minerales con 2.883 kg/año.

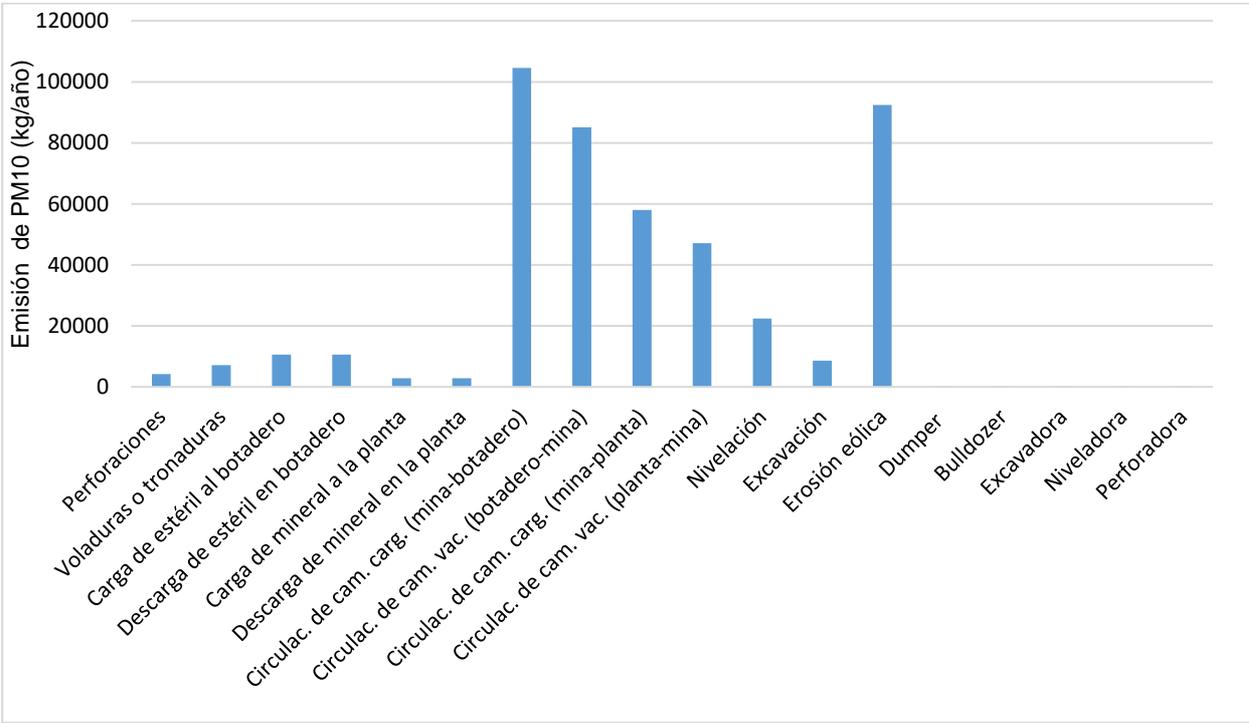


Figura 22. Emisiones de PM₁₀ (kg/año) por tipo de actividad. Fuente: Elaboración propia

La tabla 12 contiene los resultados alcanzados del cálculo de los factores de emisión para PM_{2,5} y de las emisiones de material particulado correspondiente a cada actividad.

Tabla 12: Inventario de emisiones para PM_{2,5}.

Inventario de Emisiones para PM _{2,5}				
Actividad generadora	Factor de emisión	Unidades	Emisión	Unidades
Perforaciones	0,363	kg/perforación	4.239,84	kg/año
Voladuras o tronaduras	19,68	kg/tronada	7.182,3	kg/año
Carga de estéril al botadero	0,0002	kg/ton	1.602,48	kg/año
Descarga de estéril en botadero	0,0002	kg/ton	1.602,48	kg/año
Carga de mineral a la planta	0,0002	kg/ton	436,64	kg/año
Descarga de mineral en la planta	0,0002	kg/ton	436,64	kg/año
Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados (ruta de mina-botadero)	9,49	lb/millas recorridas	100.837,26	kg/año
Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta del botadero-mina)	7,73	lb/millas recorridas	82.035,26	kg/año
Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados (ruta de mina-planta)	9,49	lb/millas recorridas	55.868,05	kg/año
Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta de planta-mina)	7,73	lb/millas recorridas	45.450,96	kg/año
Nivelación	0,017	kg/km-año	1.156,38	kg/año
Excavación	1,315	kg/hrs	3.839,05	kg/año
Erosión eólica	8,444	kg-día/ha	92.466,67	kg/año
Dumper	0,00043	kg/kw-hr	10,396	kg/año
Bulldozer	0,0013	kg/kw-hr	14,867	kg/año
Excavadora	0,00043	kg/kw-hr	13,713	kg/año
Niveladora	0,0013	kg/kw-hr	4,189	kg/año
Perforadora	0,0013	kg/kw-hr	14,867	kg/año

En la figura 23, se observa que al igual que para las emisiones de PM₁₀ analizadas con anterioridad, las actividades que poseen mayores contribuciones de PM_{2,5} al aire son las de transportación de material en su conjunto, siendo la circulación de camiones cargados por caminos sin pavimentar en la ruta mina-botadero, la de mayor emisión con un valor de 100.837 kg/año, seguidas de la erosión eólica de las pilas de acopio de minerales y de estériles con un valor de 92.466 kg/año y de las actividades de voladura, perforación y excavación que aunque no posee valores muy significativos, no se deben dejar de mencionar pues también contribuyen a la contaminación del aire por el contaminante analizado. Además, se observa que los menores valores de emisiones corresponden a los tubos de escape de los equipos empleados en las actividades mineras, donde la niveladora posee el valor mínimo con 4 kg/año; se hace notar que la nivelación y la carga y descarga de materiales también tienen bajos valores de emisión del contaminante.

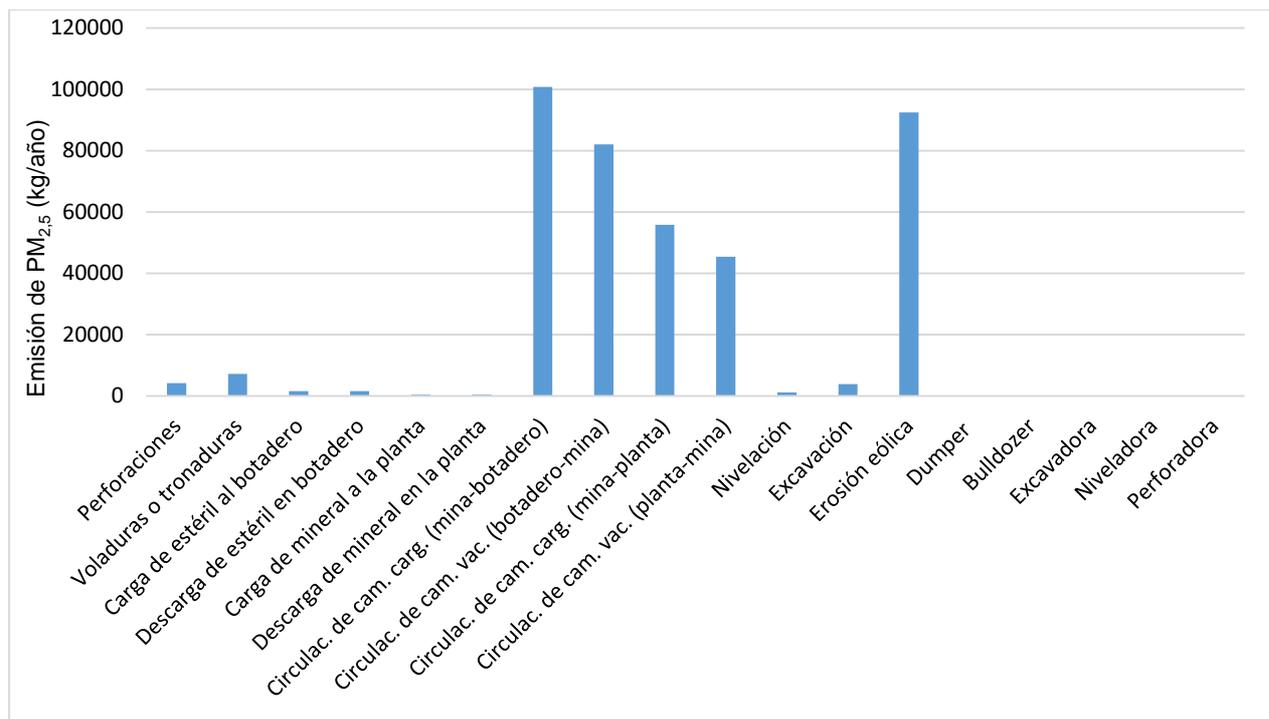


Figura 23. Emisiones de PM_{2.5} (kg/año) por tipo de actividad. Fuente: Elaboración propia

3.2. Comparación de emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} por actividad

De forma general pueden observarse en la figura 13, las emisiones de los contaminantes estudiados por cada tipo de actividad. Para ello se sumaron las emisiones provenientes de la carga y descarga de mineral y estéril, las emisiones de la circulación de camiones cargados y vacíos por caminos no pavimentados y las emisiones resultantes de las máquinas empleadas en las labores mineras, a las que se les llamó tubo de escape, expresándose como un valor total por cada actividad analizada.

Tabla 13: Resumen de las emisiones de PM₁₀ y PM_{2.5} por actividad

Emisiones de PM ₁₀ y PM _{2.5} por actividad				
Actividades	PM ₁₀		PM _{2.5}	
	E (kg/año)	%	E (kg/año)	%
Perforaciones	4.239,84	0,93	4.239,84	1,07
Voladuras o tronaduras	7.182,25	1,57	7.182,25	1,81
Carga y descarga de material	26.931,93	5,90	4.078,26	1,03
Circulación de camiones por caminos no pavimentados	294.745,64	64,55	284.191,53	71,55
Nivelación	22.381,63	4,90	1.156,38	0,29
Excavación	8.640,53	1,89	3.839,05	0,97
Erosión eólica	92.466,67	20,25	92.466,67	23,28
Tubo de escape	58,03	0,01	58,03	0,01
TOTAL	456.646,52	100	397.212,02	100

El cálculo de las emisiones totales por contaminante resultó en que las emisiones de PM₁₀ durante todo el año analizado son mayores que las de PM_{2.5}, siendo de

456.646 kg/año, mientras que para PM_{2,5} la estimación realizada revela que posee un valor total anual de 397.212 kg/año.

En el gráfico que se muestra a continuación se aprecia con mayor facilidad, las actividades que generan las principales emisiones de material particulado en la mina estudiada durante el año 2021.

Los resultados indican que la fuente de los caminos de acarreo es el emisor fundamental; representa aproximadamente el 64% de las emisiones totales de PM₁₀ y el 72% de las emisiones de PM_{2,5}, seguidas de la erosión eólica que aporta una contribución del 20% y el 23% respectivamente, mientras que las menores emisiones para cada contaminante están dadas por el tubo de escape con una contribución prácticamente imperceptible del 0,01%.

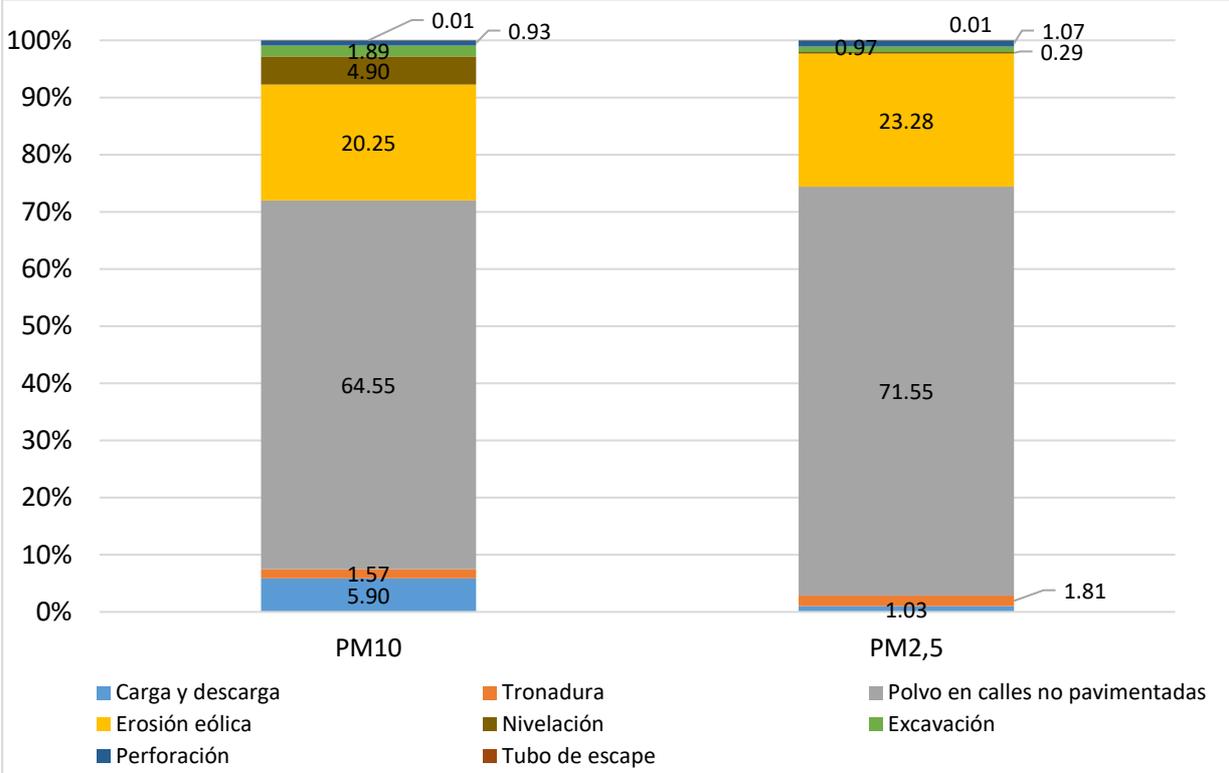


Figura 24. Gráfico comparativo entre las emisiones totales de PM₁₀ y PM_{2,5} por actividad. Fuente: Elaboración propia

3.3. Resultados de la simulación de dispersión de PM₁₀ y PM_{2,5} realizada a partir del modelo CALPUFF

De la simulación realizada para analizar el comportamiento de la dispersión de los contaminantes objeto de estudio, se obtuvieron una serie de mapas (figuras 25, 26, 27 y 28) donde se representan las emisiones totales diarias y anuales, generadas producto a las actividades realizadas en la mina. Dichos mapas se encuentran con la escala de colores adecuada a los valores límites establecidos por la Norma de la Calidad del Aire de Chile, para lograr observar con mayor claridad los lugares donde se cumplen o incumplen dichos valores.

Nótese en la figura 25, que el percentil 98 de los valores diarios de inmisión para el contaminante PM₁₀ es superado justamente en el área donde se emplaza la mina Sierra Miranda, con valores de aproximadamente 182 µg/m³, dentro de la propia explotación minera. Luego se observa que, al dispersarse las partículas en el entorno cercano por la acción del viento, las concentraciones disminuyen notablemente.

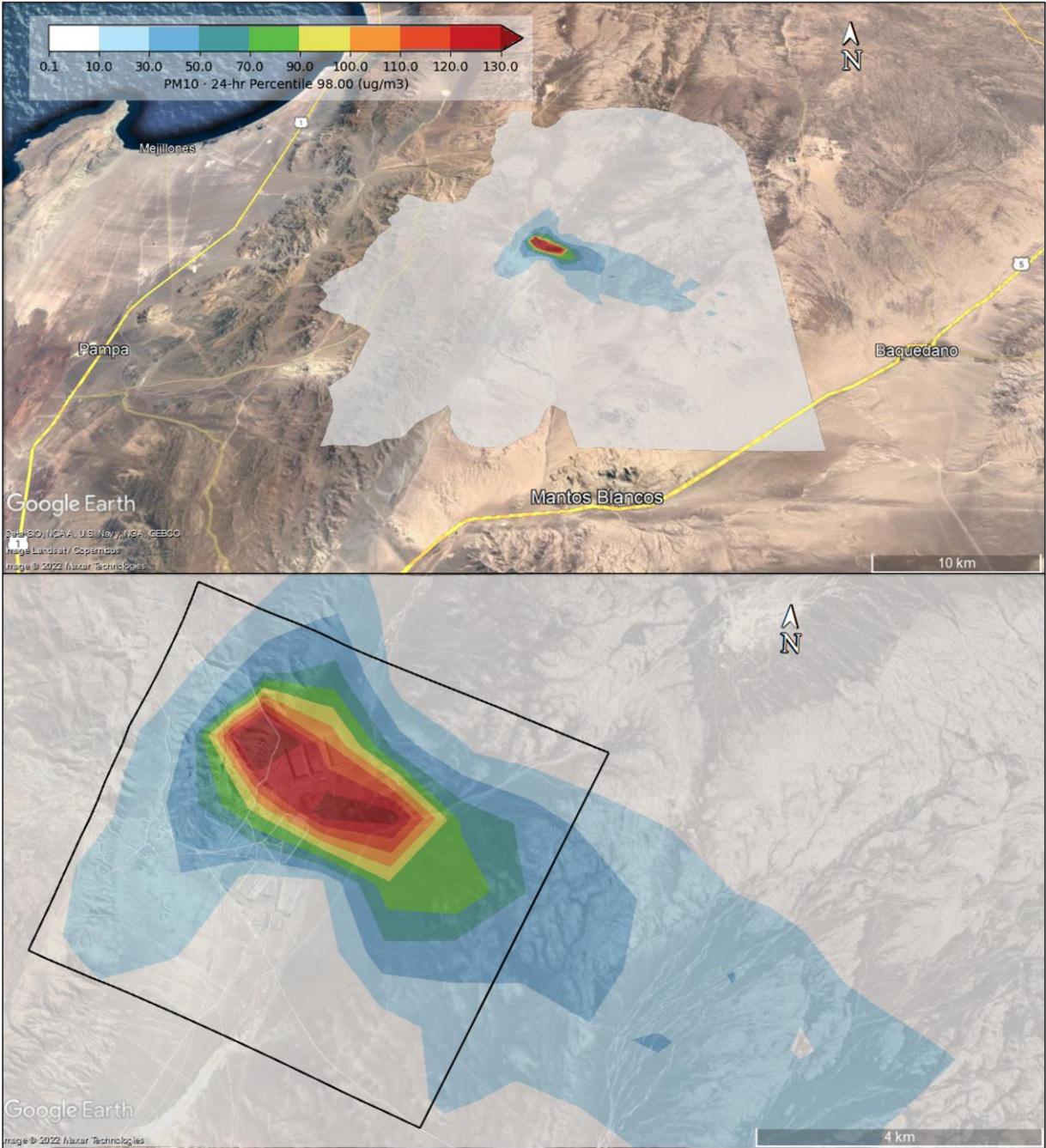


Figura 25. Mapa de distribución de concentraciones diarias (24 horas) de PM₁₀ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera. Fuente: Imagen generada a través de Google Earth Pro

Para las concentraciones anuales de PM₁₀ (figura 26), de igual forma que en el mapa anterior, se puede observar que el valor máximo permitido es superado exclusivamente en el área donde se desarrollan las actividades mineras, con valores que rondan los 88 µg/m³.

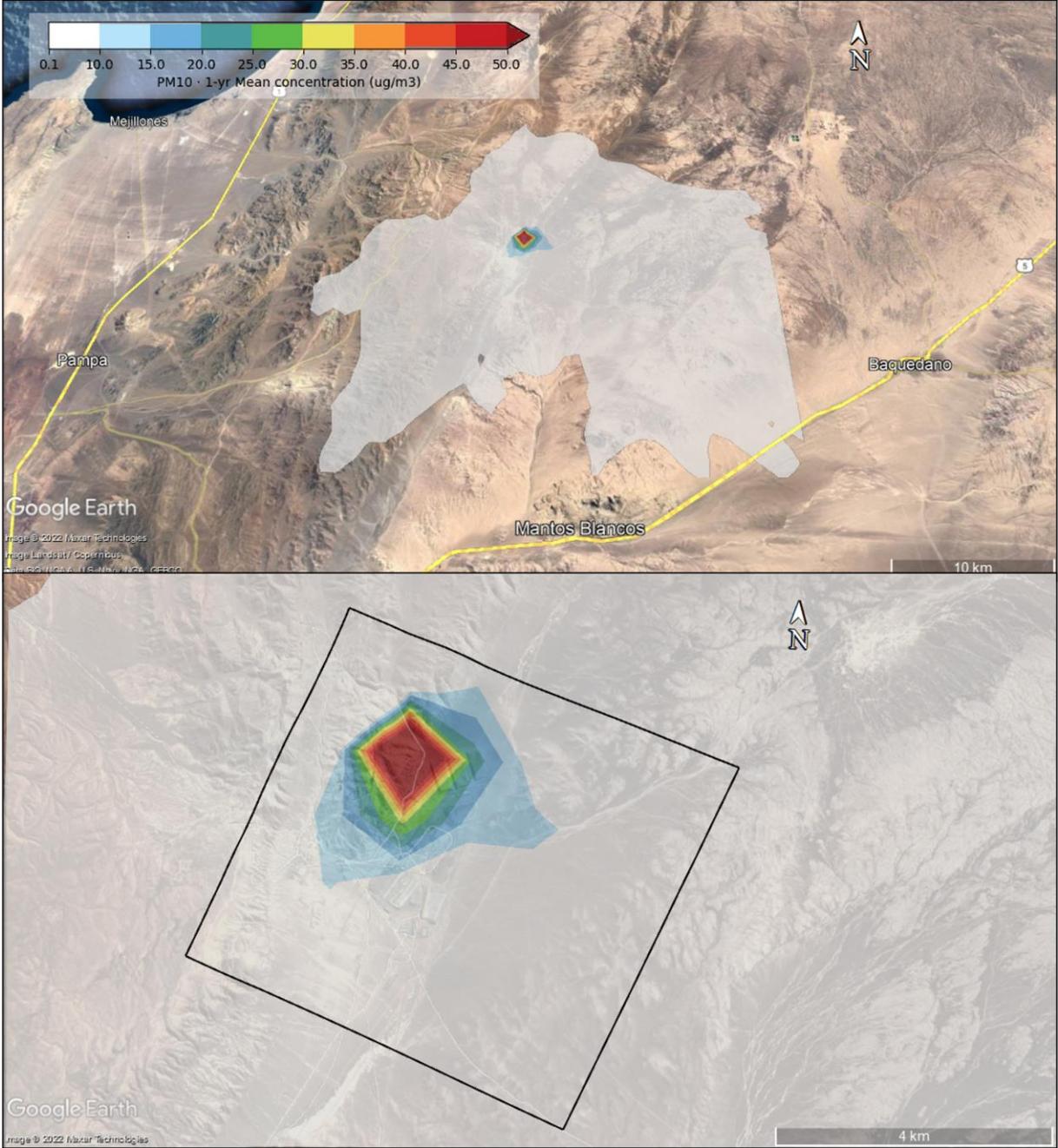


Figura 26. Mapa de distribución de concentraciones anuales de PM₁₀ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera. Fuente: Imagen generada a través de Google Earth Pro

La figura 27 muestra un comportamiento similar del contaminante PM_{2,5} con respecto al anterior analizado. El percentil 98 de los valores diarios de inmisión dentro de la mina se encuentra alrededor de los 150 µg/m³, siendo tres veces más de lo permitido por la normativa, pero en las cercanías del área de interés, el contaminante tiende a disminuir su concentración, a valores permitidos.

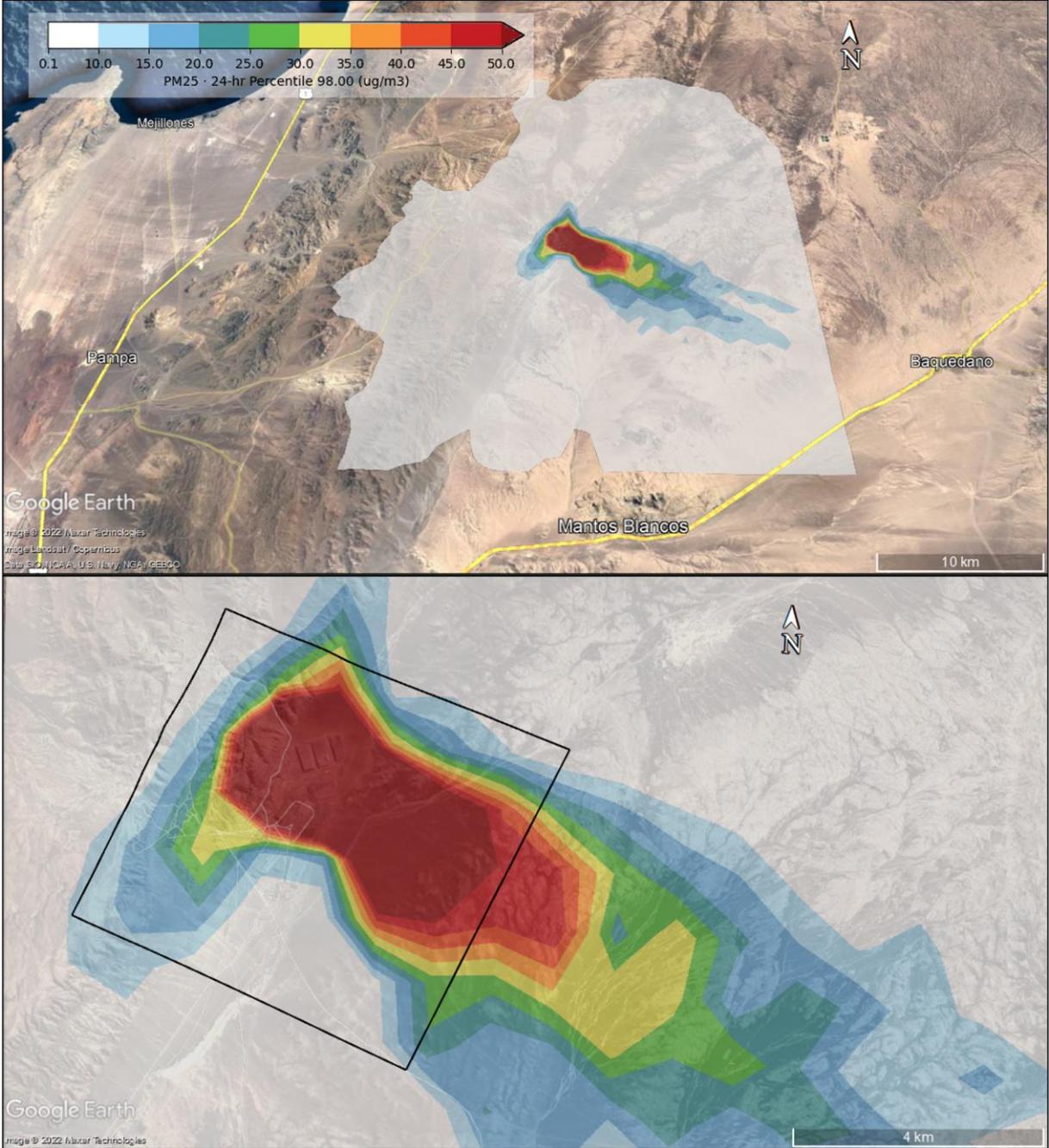


Figura 27. Mapa de distribución de concentraciones diarias (24 horas) de PM_{2,5} y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera. Fuente: Imagen generada a través de Google Earth Pro

El mapa de distribución de concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ (figura 28) posee el mismo comportamiento que los demás analizados, cabe resaltar que en el núcleo de la mina las mayores contribuciones son de $44 \mu g/m^3$.

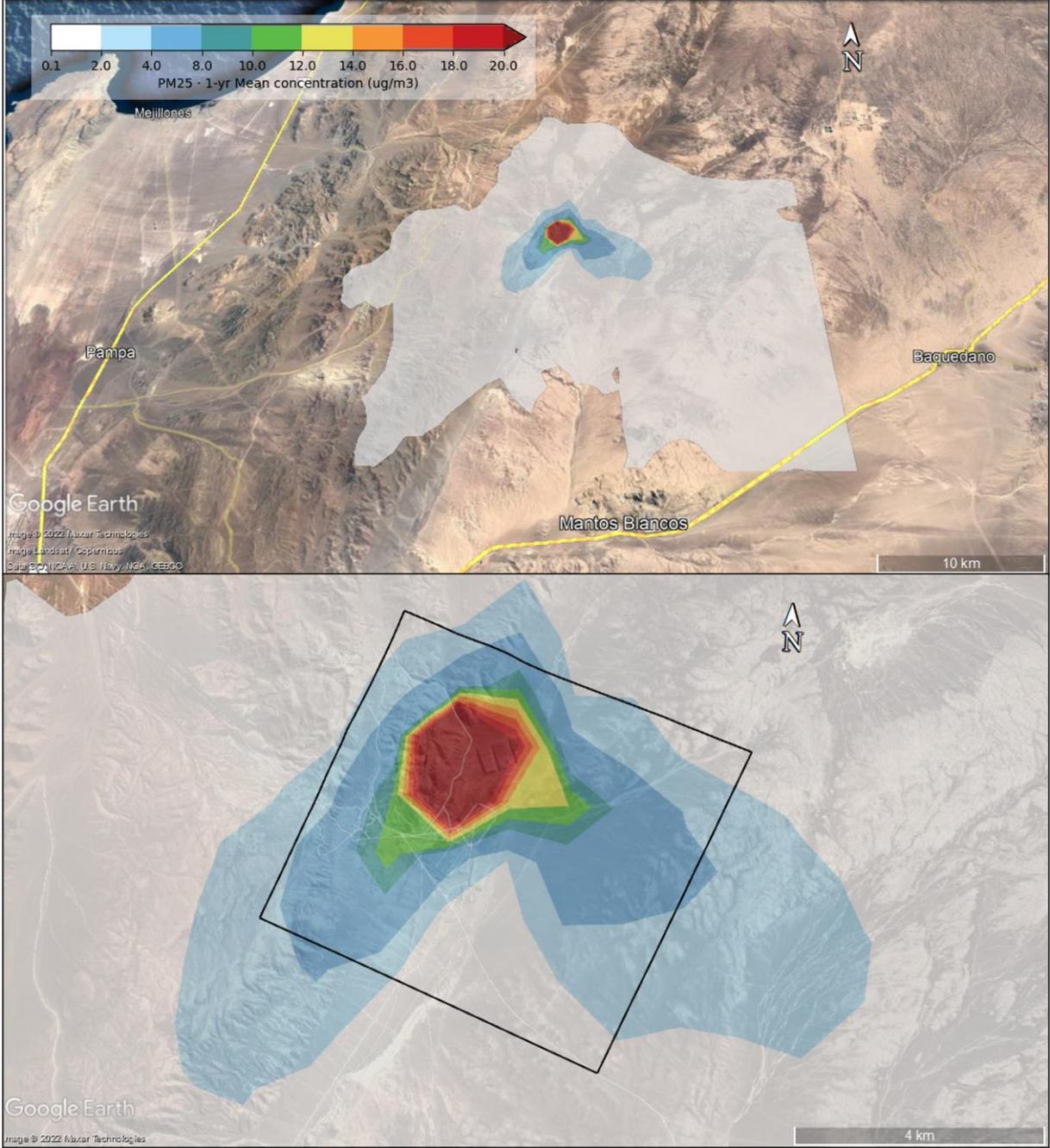


Figura 28. Mapa de distribución de concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ y zoom correspondiente en puntos cercanos a la actividad minera. Fuente: Imagen generada a través de Google Earth Pro

Luego de haber analizado los diferentes mapas de calidad del aire se diagnostican valores relativamente altos pero concentrados en el interior de la explotación minera. A continuación, se realiza el análisis de los puntos receptores que se han considerado, situados fuera del área de la explotación minera, para poder identificar

cuáles son las concentraciones de los contaminantes que afectan a dichos receptores. En la tabla 14 se observan los valores obtenidos.

Tabla 14: Valores de las concentraciones totales diarias y anuales para PM₁₀ y PM_{2,5} que afectan a cada punto receptor.

Receptores	Coordenadas		Concentración total (µg/m ³)			
	UTMx (m)	UTMy (m)	PM ₁₀ anual (50 µg/m ³)	PM ₁₀ diario (130 µg/m ³)	PM _{2,5} anual (20 µg/m ³)	PM _{2,5} diario (50 µg/m ³)
1	385890	7426602	1	2	1	2
2	384890	7433802	1	4	1	3
3	387800	7433802	1	6	2	5
4	384370	7429500	4	13	3	11
5	366730	7442250	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Según los resultados reflejados en la tabla 14, se concluye que los valores son muy bajos, siendo el mayor de los valores 13 µg/m³ correspondiente a la concentración diaria de PM₁₀ en el receptor Oeste y los valores más pequeños llegan a ser < 0,1 µg/m³, por tanto, fuera de la explotación minera no existen afectaciones de la calidad del aire debido a las actividades efectuadas en la misma.

3.3.1. Actividades con mayor contribución a las emisiones totales

A partir del análisis de los valores de emisiones anuales y diarios de cada actividad, se ha diagnosticado que estos en general son relativamente bajos en comparación con la legislación vigente. En el caso de PM₁₀ las concentraciones máximas del percentil 98 según el valor diario son de 74 µg/m³ (Figura 29d) y anuales de 26 µg/m³ (Figura 29b), correspondientes a las actividades de transportación de estéril por caminos no pavimentados (ruta mina-botadero) y carga de dicho material respectivamente.

Para el caso de PM_{2,5}, existen solo tres actividades que superan los valores diarios permitidos, siendo estas, la circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados en la ruta del botadero a la mina (Figura 30g), la circulación de camiones cargados (transportación de estéril) por caminos no pavimentados (Figura 30h) y la erosión eólica del acopio de estéril producto de la acción del viento (Figura 30f), con valores que oscilan entre los 60 µg/m³ y 80 µg/m³; las concentraciones anuales, que sobrepasan los límites establecidos por la normativa, llegan a los 24 µg/m³ (Figura 31j) correspondiente a la erosión antes mencionada. Estas actividades han sido identificadas como las fuentes que generan las mayores contribuciones de material particulado a las emisiones totales.

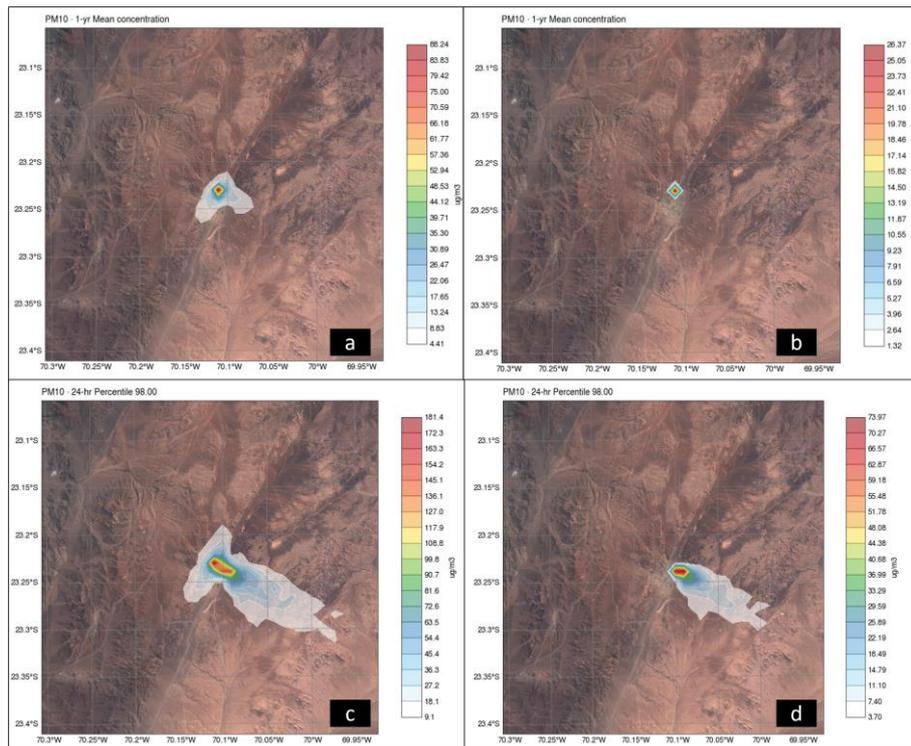


Figura 29. a) Mapa de concentración anual de PM_{10} considerando todas las fuentes. b) Mapa de concentración anual de PM_{10} correspondiente a la actividad de carga de estéril. c) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de PM_{10} considerando todas las fuentes. d) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de PM_{10} correspondiente a la actividad de transportación de estéril por caminos no pavimentados (ruta mina-botadero)

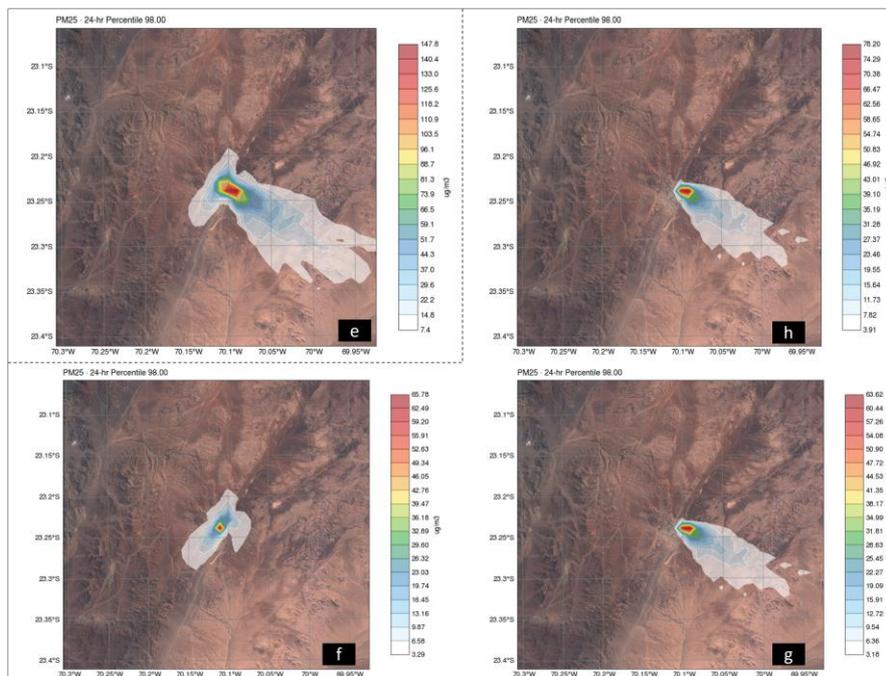


Figura 30. e) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2.5}$ considerando todas las fuentes. f) Mapa de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2.5}$ correspondiente a la erosión eólica del acopio de estéril. g)-h) Mapas de concentración del percentil 98 según el valor diario de $PM_{2.5}$ correspondientes a las actividades de circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados (ruta del botadero-mina) y circulación de camiones cargados (transportación de estéril) por caminos no pavimentados respectivamente

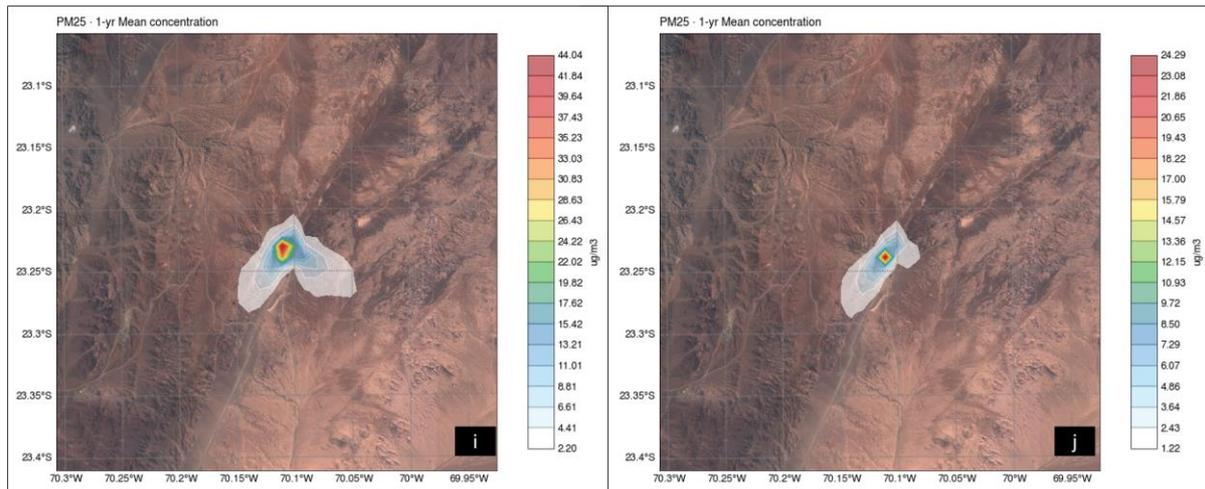


Figura 31. i) Mapa de concentración anual de $PM_{2,5}$ considerando todas las fuentes. j) Mapa de concentración anual de $PM_{2,5}$ correspondiente a la erosión eólica del acopio de estéril

3.3.1.1. Recomendaciones a la explotación minera de Sierra Miranda

Aunque la actividad de la mina tiene un impacto pequeño sobre los niveles de la calidad del aire, existen una serie de medidas que mejorarían aún más las concentraciones de contaminantes, entre las que se pueden mencionar:

- 1- La humectación o riego con agua de las vías no pavimentadas.
- 2- La estabilización de los caminos con Bischofita, la cual permite el control de polvo y reduce en más del 90% el consumo de agua empleada para el riego de los caminos.
- 3- El control de la velocidad sobre las vías de tránsito, recomendándose una velocidad límite de 40 km/h.
- 4- La instalación de barreras rompe vientos alrededor de los acopios de materiales.
- 5- El empleo de láminas filtrantes sintéticas, también conocidas como geotextiles, que posibilitan disminuir la cantidad total de partículas suspendidas en un 58% y de partículas respirables en un 46% en dependencia de los materiales empleados en la sub-base de la carretera. También se utilizan en el control de la erosión eólica.
- 6- La pavimentación de los accesos permanentes del proyecto.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

A partir del estudio realizado para diagnosticar el impacto ambiental de las diferentes actividades que se desarrollan en Mina Sierra Miranda sobre el entorno, se concluye que:

- 1- Las actividades generadoras de dispersión de contaminantes PM_{10} y $PM_{2,5}$ en las operaciones mineras están constituidas por las actividades de carga y descarga de los materiales, ya sea estéril o mineral; por la circulación de camiones a través de caminos no pavimentados; por la erosión eólica producto a la acción del viento sobre los acopios de materiales; por las perforaciones y tronaduras o voladuras realizadas; además de las actividades de nivelación y excavación y la combustión de los motores de maquinarias y camiones utilizados.
- 2- A partir de los factores de emisión calculados, se obtuvieron las emisiones de material particulado para cada una de las actividades identificadas como fuentes generadoras (inventario de emisiones) en Mina Sierra Miranda. Dichos resultados han permitido concluir que en general, la circulación de camiones por caminos sin pavimentar, principalmente en la ruta de la mina hacia el botadero, poseen las mayores contribuciones de PM_{10} y $PM_{2,5}$ al área circundante, representando el 64% y el 72% de las emisiones totales para el caso de PM_{10} y $PM_{2,5}$ respectivamente; las cuales son precedidas por la erosión eólica que tiene un aporte a las contribuciones de PM_{10} del 20% y de $PM_{2,5}$ del 23%.
- 3- También se observa, que las menores contribuciones de los contaminantes analizados estuvieron dadas por las emisiones de los tubos de escape de las maquinarias y equipos empleados en la operación minera durante el año 2021, siendo su aportación mínima de un 0,01% con respecto a las emisiones totales.
- 4- Los vientos dominantes en la región son los vientos del noreste como primera dirección predominante y los vientos del nornoreste y oeste noroeste como segunda y tercera respectivamente.
- 5- El análisis e interpretación de los datos de salida del modelo de calidad del aire utilizado para la simulación de la dispersión de los contaminantes, muestra que, existen valores que superan los límites permitidos por la normativa vigente en Chile únicamente en localizaciones geográficas de la propia mina.
- 6- Al dispersarse las partículas en el entorno cercano por la acción del viento, las concentraciones disminuyen notablemente, no llegando a superarse en ninguno de los puntos del dominio de modelización fuera del área de la mina, los valores límites de inmisión definidos por la administración chilena.
- 7- Teniendo en cuenta, todo lo anteriormente expuesto y los resultados obtenidos para los receptores analizados, se puede concluir que la Mina Sierra Miranda no aporta grandes contribuciones a los niveles de calidad del aire del entorno en el que se encuentra ubicada.

REFERENCIAS

- Alvear Parraguez, M. A., & Olivares Cisternas, E. A. (2020). Estudio de polución atmosférica y escasez hídrica en la mina El Soldado, Comunidad El Melón [Grado]. Universidad Andrés Bello.
- Arellano, A., & Albert, C. (2017). Municipios mineros I: los millones de Los Pelambres que se esfumaron en Salamanca. <https://www.ciperchile.cl/2017/08/21/municipios-mineros-i-los-millones-de-la-minera-los-pelambres-que-se-esfumaron-en-salamanca/>
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2021). Clima y Vegetación Región de Antofagasta. <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region2/clima.htm#:~:text=Sus%20principal es%20caracter%C3%ADsticas%20son%20las,sobrepasan%20los%20100%20mm%20anuales>
- Biblioteca Nacional de Chile (2021). El impacto ambiental de la minería en Chile. <http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3388.html#presentacion>
- Blondel, E. (2021, enero 14). Acopio por Pertinencia: Cómo saltarse las normas medioambientales dañando gravemente la calidad de vida de la comunidad. *Pressenza Internacional Press Agency*. <https://www.pressenza.com/es/2021/01/acopio-por-pertinencia-como-saltarse-las-normas-medioambientales-danando-gravemente-la-calidad-de-vida-de-la-comunidad/>
- Boldo, E. (2016). La contaminación del aire (Más que salud Colección Editada Conjuntamente con el Instituto de Salud Carlos III).
- Bordoli & Consultores Asociados E.I.R.L. (2012). Informe de emisiones: Proyecto de explotación Sector Simoide y Valentina Sur (p. 22).
- Bravo Vergara, M. J. (2019). Análisis de la calidad del aire en la región de Atacama, Chile [Máster]. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Burgada, S. (2018, septiembre 7). Fragmentación y tronadura: Optimización energética de operaciones mineras. *Minería chilena*. <https://www.mch.cl/informes-tecnicos/fragmentacion-tronadura-optimizacion-energetica-operaciones-mineras/>
- Cantos Zambrano, J. E. (2019). Incidencia Ambiental de Actividades Mineras por Emisiones a la Atmósfera: El caso de Manabí (Ecuador) [Master]. Universidad de Sevilla.
- Carrillo Montero, A., & González Valle, D. (2008). Inventario de emisiones de la zona minera del Cesar [Grado]. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Centro de Información de Recursos Naturales. (2016). Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos. <http://sitha.ciren.cl>
- Dios Noceda, M. (2013). Estimación, análisis y evaluación de inventarios de emisiones atmosféricas antropogénicas a escala local, regional y continental. [Doctorado]. Universidad de Santiago de Compostela.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2022). Servicios Climáticos. <http://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>
- Duque T., J. F. (2016). Sobre los efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud.

- EPA (2009a). Air pollution definition. Office of the Administrator/Office of External Affairs and Environmental Education.
- EPA (2009b). AP-42: Compilation of Air Emissions Factors. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- EPA (2022). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Escobar Melero, J., Bordones Nuñez, J., Norambuena Castro, L., & Reinoso Durán, A. (2011). Guía Metodológica. Inventario de Emisiones Atmosféricas. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/GuiaMInventarioEmisionesAtmosfericas2011.pdf>
- European Environment Agency. (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook>
- Galvis-Vizcaíno, S. A., León-Barraza, I. R., Padilla-Urueta, K. del S., Pombo-Navas, M. Y., Marcela Beatriz, R.-C., Vera-Brand, J., & Rebolledo-Cobos, R. C. (2021, septiembre). Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: Una revisión narrativa. *Rev Asoc Esp Med Trab*, 30(3), 362-372.
- Gatica Eguiguren, M. de los Á. (2020). Contaminación del aire por material particulado atribuible a quema de leña y su impacto en la presentación de desórdenes hipertensivos y preeclampsia en una cohorte retrospectiva de embarazadas en Temuco, Chile [Grado]. Universidad de Chile.
- Gligo Viel, N., & Boll Stiftung, H. (2016). Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile.Comparación 1999-2015 (Centro de Análisis de Políticas Públicas).
- Herrera Herbert, J. (2006). Métodos de minería a cielo abierto. Universidad Politécnica de Madrid.
- Hilson & Nayee. (2001). Environmental management system implementation in the mining industry: A key to achieving cleaner production.
- Jorquera, H. (2012). Descripción del modelo CALPUFF). Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Jorratt, M. (2021). Renta económica, régimen tributario y transparencia fiscal en la minería del cobre en Chile y el Perú (Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)). Naciones Unidas.
- Lagos, G. (2014). Impactos ambientales de la minería en Chile. https://www.researchgate.net/publication/242415121_Impactos_ambientales_de_la_mineria_en_Chile
- Martínez Grimaldo, A., & Takahashi, K. (2017, junio). ¿El Niño costero o Fenómeno El Niño?, 170, 34-37.
- Meteosim SL (2003). <https://meteosim.com/>
- Ministerio de Energía. (2022). Explorador Eólico. <https://eolico.minenergia.cl/exploracion>
- Neira, M. P. (2019). Air Pollution and Human Health:A Comment from the World Health Organization.*Annals of Global Health*. 85(1), 141. <https://doi.org/10.5334/aogh.2712>
- Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales. (1997). Impactos ambientales de la minería metálica en Chile (Cobre y Oro).

- OMS (2021). Contaminación del aire ambiente (exterior). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). Minería Ambiental: Una introducción a los Impactos y su Remediación. (GEMM).
- Querol, X. (2018). La calidad del aire en las ciudades: Un reto mundial (Fundación Gas Natural Fenosa).
- Quijano Hurtado, J. (2013). Aplicación de la topografía en minería a cielo abierto. Mina La Calera- Cementos Argos-Yumbo- Valle [Grado]. Universidad del Quindío.
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000, enero). A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Tech. Inc, 521.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2020). Anuario de la Minería de Chile. www.sernegeom.cl
- SINCA. Normativa aplicable. <https://sinca.mma.gob.cl/index.php/pagina/index/id/norma>
- Tapia, J. S., Valdés, J., Orrego, R., Tchernitchin, A., Dorador, C., Bolados, A., & Harrod, C. (2018, abril 24). Geologic and anthropogenic sources of contamination in settled dust of a historic mining port city in northern Chile: Health risk implications. <https://doi.org/10.7717/peerj.4699>
- Trinity Consultants. (2020). The Differences Between AERMOD and CALPUFF. <https://www.trinityconsultants.com/news/the-differences-between-aermod-and-calpuff>
- Universidad de Chile (2021). Especialistas U. de Chile alertan sobre los peligros de la contaminación atmosférica en la salud. <https://uchile.cl/noticias/176877/especialistas-uch-alertan-los-peligros-de-la-contaminacion-atmosferica>
- Vicencio, J., & Campos, D (2019, febrero 15). El Niño ha llegado. Boletín S2S – Pronóstico Estacional.
- World Health Organization (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: Final technical report. Copenhagen pp 309. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf
- Zuazo Urionabarrenetxea, I (2018). Desarrollo de un inventario de emisiones atmosféricas sobre plataforma SIG. Aplicación en la Comunidad Autónoma de Euskadi [Doctoral]. Universidad del País Vasco.

ANEXOS

Anexo I

Cálculo de los factores de emisión (kg/ton) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para las actividades de carga y descarga de mineral y estéril a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	k	U(m/s)	M(%)	E(kg/ton)
PM10	0.35	5.4	2.5	0.00132
PM2.5	0.053	5.4	2.5	0.00020

$$E = k \times 0.0016 \times \left(\frac{U}{5.4}\right)^{1.3} \left(\frac{M}{2.5}\right)^{1.4}$$

Donde:

E: factor de emisión (kg/ton de material transferido)

k: multiplicador del tamaño de partículas

U: velocidad promedio del viento= 5,4 (m/s)

M: contenido de humedad del material (%)

$$E = Fe \times Na$$

Donde:

E: emisiones (kg/año)

Fe: factor de emisión (kg/ton)

Na: cantidad de material cargado (ton/año)

Carga de mineral a la planta				
Material Particulado	Fe(kg/ton)	Na (ton/año)	Na (ton/año)	E (kg/año)
PM10	0.001317	3600000	2190000	2883.504
PM2.5	0.000199	3600000	2190000	436.645

Carga de estéril al botadero				
Material Particulado	Fe(kg/ton)	Na (ton/año)	Na (ton/año)	E (kg/año)
PM10	0.001317	13212000	8037300	10582.459
PM2.5	0.000199	13212000	8037300	1602.487

Descarga de mineral a la planta			
Material Particulado	Fe(kg/ton)	Na (ton/año)	E (kg/año)
PM10	0.00132	2190000	2883.504
PM2.5	0.000199	2190000	436.645

Descarga de estéril al botadero			
Material Particulado	Fe(kg/ton)	Na (ton/año)	E (kg/año)
PM10	0.00132	8037300	10582.459
PM2.5	0.000199	8037300	1602.487

Anexo II

Cálculo de los factores de emisión (kg/tronada) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para las tronaduras a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	A(m2)	E(kg/tronada)	Tronadas/año	E (kg/año)
PM10	2000	19.677	365	7182.250
PM2.5	2000	19.677	365	7182.250

$$E[\text{kg / tronada}] = 0,00022 \times (A)^{1,5}$$

Donde:

E: factor de emisión (kg/tronada)

A: área de la tronadura (m2)

Tronadas al año : 365 tronadas (1 diaria)

Área total a tronar : 73 ha

Anexo III

Cálculo de los factores de emisión (gr/vehículo-km) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para la circulación de camiones por caminos no pavimentados a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados Mina-Planta y Mina-Botadero							
Material Particulado	k	a	b	s (%)	W (ton)	E (lb/millas recorridas)	E (gr/vehículo-km)
PM10	1.8	0.7	0.45	10	174	9.849	2775.913
PM2.5	1.8	0.9		10	174	9.496	2676.514

$$E = k (s/12)^a (W/3)^b$$

Donde:

E: factor de emisión [lb/millas recorridas].

k: factor de corrección por tamaño de partículas [adimensional]

s: contenido de partículas finas en la superficie de la calle [%]

a; b: constantes

W: peso promedio de los vehículos (ton)

Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados Mina-Planta y Mina-Botadero							
Material Particulado	k	a	b	s (%)	W (ton)	E (lb/millas recorridas)	E (gr/vehículo-km)
PM10	1.8	0.7	0.45	10	110	8.0125	2258.319
PM2.5	1.8	0.9		10	110	7.7256	2177.455

Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados Mina-Planta						
Material Particulado	E (gr/vehículo-km)	F (vehículo/día)	L (km)	d	E (gr/año)	E (kg/año)
PM10	2775.913	93.75	0.61	0	57942841.1	57942.841
PM2.5	2676.514	93.75	0.61	0	55868053.1	55868.053

$$E_{\text{anual}} = E \times F \times L \times (365-d)$$

Donde:

E: Emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [g/año]

E: factor de emisión de partículas por calle (gr/vehículo-km)

F: Flujo vehiculo diario (vehículo/día)

L: longitud del tramo (km)

d: número de días con precipitaciones mayores de 0,25mm

Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados Mina-Planta						
Material Particulado	E (gr/vehículo-km)	F (vehículo/día)	L (km)	d	E (gr/año)	E (kg/año)
PM10	2258.319	93.75	0.61	0	47138888	47138.888
PM2.5	2177.455	93.75	0.61	0	45450962.4	45450.962

Circulación de camiones cargados por caminos no pavimentados Mina-Botadero						
Material Particulado	E (gr/vehículo-km)	F (vehículo/día)	L (km)	d	E (gr/año)	E (kg/año)
PM10	2775.913	344.063	0.3	0	104582079	104582.0788
PM2.5	2676.514	344.063	0.3	0	100837256	100837.2565

Circulación de camiones vacíos por caminos no pavimentados Mina-Botadero						
Material Particulado	E (gr/vehículo-km)	F (vehículo/día)	L (km)	d	E (gr/año)	E (kg/año)
PM10	2258.319	344.063	0.3	0	85081828.9	85081.829
PM2.5	2177.455	344.063	0.3	0	82035261.7	82035.262

Anexo IV

Cálculo de los factores de emisión (kg/km-año) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para la nivelación a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	k	S (km/h)	Fe (kg/km-año)	d (km/año)	E (kg/año)
PM10	0.6	10	0.336	66612	22381.632
PM2.5	0.031	10	0.01736	66612	1156.38432

$$F_e (PM_{10}; PM_{2,5}) \left(\frac{kg}{VKT} \right) = 0,0056 * k * (S)^2$$

Donde:

S: velocidad media del vehículo (km/h)

k: factor del tamaño de partícula (adimensional)

Fe: factor de emisión (kg/km-vehículo)

$$E = F_e * d$$

Donde:

E: emisión (kg/año)

Fe: factor de emisión (kg/km-vehículo)

d : distancia recorrida (km/año) = 66612 km

Anexo V

Cálculo de los factores de emisión (kg/kw-hr) y las emisiones (kg/día; kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} producto a la combustión de los motores de las maquinarias empleadas a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Datos				Factor de emisión (kg/kw-hr)		Emisiones (kg/día)		E (kg/año)	
Tipo de equipo	W (kw)	C (%)	T (hrs/día)	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5	PM10	PM2,5
Dumper	552	1	12	0.0004	0.0004	0.0285	0.0285	10.396	10.396
Bulldozer	261.1	1	12	0.0013	0.0013	0.0407	0.0407	14.867	14.867
Excavadora	728.1	1	12	0.0004	0.0004	0.0376	0.0376	13.713	13.713
Niveladora	179	1	12	0.0013	0.0013	0.0279	0.0279	4.189	4.189
Perforadora	261.1	1	12	0.0013	0.0013	0.0407	0.0407	14.867	14.867

$$E = Fe * C * T * W$$

Donde:

E: Emisiones del contaminante i producidas por un vehículo tipo k [kg/día]

Fe: Factor de emisión del contaminante i para los vehículos tipo k [kg/kw-h]

C: Porcentaje de carga (respecto a la potencia nominal) durante la operación normal de los vehículos tipo k

T: Tiempo de operación promedio de los vehículos del tipo k [h]

W: Potencia nominal [kw]

Anexo VI

Cálculo de los factores de emisión (kg-día/ha) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para la erosión eólica de los acopios de mineral y estéril a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	s (%)	f (%)	p	FE (kg-día/ha)	Am (Ha)	E (kg/día)	E (kg/año)
PM10	10	10	0	8.444	30	253.333	92466.667
PM2.5	10	10	0	8.444	30	253.333	92466.667

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 agua

Am: Área expuesta [Ha]=30 Ha

$$FE = 1.9 \left(\frac{s}{1.5} \right) \left(\frac{f}{15} \right) \left(\frac{365-p}{365} \right)$$

ACOPIO de minerales

Material Particulado	s (%)	f (%)	p	FE (kg-día/ha)	Am (Ha)	E (kg/día)	E (kg/año)
PM10	10	10	0	8.444	12	101.333	36986.667
PM2.5	10	10	0	8.444	12	101.333	36986.667

ACOPIO de Esteril

Material Particulado	s (%)	f (%)	p	FE (kg-día/ha)	Am (Ha)	E (kg/día)	E (kg/año)
PM10	10	10	0	8.444	18	152	55480
PM2.5	10	10	0	8.444	18	152	55480

$$E = Fe * Am$$

Donde :

E : Emisión anual de partículas para el tramo de calle sin pavimentar [kg/día].

FE : Factor de emisión de PTS kg-día/ha de superficie activa

Am : Área expuesta [ha]

Área de acopio de mineral = 12 Ha

Área de acopio de esteril = 18 Ha

Anexo VII

Cálculo de los factores de emisión (kg/hrs) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para la excavación a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	s (%)	M (%)	Fe (kg/hrs)	t (hrs/día)	E (kg/día)	E (kg/año)
PM10	10	2.5	2.95908721	12	23.673	8640.535
PM2.5	10	2.5	1.3147423	12	10.518	3839.048

$$F_e(PM_{10}) \left(\frac{kg}{hr} \right) = 0,3375 * \frac{(s)^{1,5}}{(M)^{1,4}} \qquad F_e(PM_{2,5}) \left(\frac{kg}{hr} \right) = 0,273 * \frac{(s)^{1,2}}{(M)^{1,3}}$$

Donde:

s: porcentaje de finos

M: porcentaje de humedad del material

$$E = F_e * t$$

Donde:

F_e= Factor de emisión (kg/hrs)

t = Tiempo de operación en horas (hrs/día)

E= Emisiones (kg/día)

Anexo VIII

Cálculo de los factores de emisión (kg/perforación) y las emisiones (kg/año) de PM₁₀ y PM_{2,5} para la actividad de perforación a partir de la hoja de cálculo MS Excel

Material Particulado	Fe (kg/perforación)	Q (perforación/día)	E (kg/día)	E (kg/año)
PM10	0.363	32	11.616	4239.84
PM2.5	0.363	32	11.616	4239.84

$$E = F_e * Q$$

Donde:

F_e= Factor de emisión (kg/ton)

Q= Cantidad de perforaciones al día (perforación/día)

E= Emisiones (kg/año)