Proyecto “Modificación Proyecto Distrito Norte”

Declaración de Impacto Ambiental

Compañía Mantos de la Luna

Anexo 5.1 Estimación y Modelación de Emisiones Atmosféricas

Documento elaborado para

Octubre, 2026

Consultoría y Tecnología al Servicios del Medio Ambiente
San Sebastián 2839, of 305, Las Condes
contacto@csw.cl

ÍNDICE DE CONTENIDO

1 Introducción 6

2 Estimación de emisiones del proyecto 7

2.1 Ecuación general para el cálculo de emisiones 7

2.2 Actividades o fuentes de emisión 8

2.3 Cronograma general 9

2.4 Cronograma de las actividades emisoras 10

2.5 Cálculo de emisiones de fase de operación 10

2.5.1 Emisiones por combustión de maquinaria fuera de ruta 10

2.5.2 Emisiones por combustión de vehículos 16

2.5.3 Emisiones por tránsito de vehículos por vías no pavimentadas 22

2.5.4 Emisiones por perforaciones 27

2.5.5 Emisiones por movimiento de tierra 28

2.5.6 Emisiones por acopio de tierra 31

2.5.7 Emisiones por tronaduras 32

2.5.8 Resumen emisiones anuales fase de operación 34

2.6 Cálculo de emisiones de fase de cierre 38

2.6.1 Emisiones por combustión de maquinaria fuera de ruta 38

2.6.2 Emisiones por combustión de vehículos 41

2.6.3 Emisiones por tránsito de vehículos por vías no pavimentadas 42

2.6.4 Emisiones por movimiento de tierra 45

2.6.5 Resumen emisiones anuales fase de cierre 47

3 Resumen emisiones por año cronológico 48

4 Conclusiones Estimación de emisiones atmosféricas 49

5 Bibliografía 50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Actividades generadoras de emisiones 8

Tabla 2. Cronograma general 9

Tabla 3. Cronograma actividades fase de operación 10

Tabla 4. Cronograma actividades fase de cierre 10

Tabla 5. Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria 11

Tabla 6. Factor de deterioro maquinaria 12

Tabla 7. Factor de ajuste transiente 12

Tabla 8. Factor de emisión base operación de maquinaria 13

Tabla 9. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 1 al 3 Rajo 14

Tabla 10. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 1 al 5 UG 14

Tabla 11. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 6 al 28 UG 14

Tabla 12. Emisiones maquinaria fase operación año 1 al 3 y año 1 al 5 (t/año) 15

Tabla 13. Emisiones maquinaria fase operación año 6 al 28 (t/año) 16

Tabla 14. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km) 17

Tabla 15. Distancia recorrida vehículos (Km) 17

Tabla 16. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase operación años del 1 al 5 (t/año) 19

Tabla 17. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase operación años del 6 al 28 (t/año) 21

Tabla 18. Parámetros y factores de emisión para caminos no pavimentados 23

Tabla 19. Pesos vehículos 23

Tabla 20. Nivel de actividad tránsito de vehículos por vías no pavimentadas fase operación 24

Tabla 21. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km) 25

Tabla 22. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas años del 1 al 5 26

Tabla 23. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas años del 6 al 28 27

Tabla 24. Factores de emisión por perforación 27

Tabla 25. Nivel de actividad perforaciones por año 27

Tabla 26. Emisiones por perforaciones fase operación años del 1 al 5 28

Tabla 27. Emisiones por perforaciones fase operación años del 6 al 28 28

Tabla 28. Factores de emisión por transferencia de material 29

Tabla 29. Nivel de actividad carga y descarga material 29

Tabla 30. Emisiones por transferencia de material fase operación año 1 al 5 30

Tabla 31. Emisiones por transferencia de material fase operación año 6 al 28 30

Tabla 32. Factores de emisión erosión eólica material en pila 31

Tabla 33. Nivel de actividad material en pila 32

Tabla 34. Emisiones por acopio (t/año) 32

Tabla 35. Factores de emisión por tronadura 33

Tabla 36. Nivel de actividad tronaduras por año 33

Tabla 37. Emisiones por tronadura fase operación años del 1 al 3 33

Tabla 38. Emisiones totales fase operación año 1 al 3 Rajo 34

Tabla 39. Emisiones totales fase operación año 1 al 5 UG 35

Tabla 40. Emisiones totales fase operación año 1 al 3 Rajo + UG 36

Tabla 41. Emisiones totales fase operación año 6 al 28 UG 37

Tabla 42. Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria..... 39

Tabla 43. Factor de deterioro maquinaria 39

Tabla 44. Factor de ajuste transiente 39

Tabla 45. Factor de emisión base operación de maquinaria 40

Tabla 46. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase de cierre..... 40

Tabla 47. Emisiones maquinaria fase de cierre (t/año) 40

Tabla 48. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km)..... 41

Tabla 49. Distancia recorrida vehículos (Km)..... 41

Tabla 50. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase cierre (t/año) 42

Tabla 51. Parámetros y factores de emisión para caminos no pavimentados..... 43

Tabla 52. Pesos vehículos 43

Tabla 53. Nivel de actividad tránsito de vehículos por vías no pavimentadas fase cierre 44

Tabla 54. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas fase de cierre 45

Tabla 55. Factores de emisión por transferencia de material 46

Tabla 56. Nivel de actividad carga y descarga material 46

Tabla 57. Emisiones por transferencia de material fase de cierre..... 46

Tabla 58. Emisiones totales fase cierre..... 47

Tabla 59. Emisiones por año cronológico 48

Índice de figuras

Figura 1. Rutas de referencia de los vehículos..... 9

Apéndices

Apéndice 1. Rutas Proyecto

1 Introducción

El Proyecto que ingresa al Sistema de Evaluación Ambiental (SEIA) por medio de la presente Declaración de Impacto Ambiental (DIA), corresponde al proyecto denominado "Modificación Proyecto Distrito Norte" en adelante "El Proyecto", que tiene como propósito extender la vida útil y aumentar la tasa de explotación del "Proyecto Distrito Norte", aprobado ambientalmente mediante Res. Ex. N°0006/2021. Esto, a través de una mayor explotación del yacimiento de cobre Las Marías, ubicado en el área misma del Proyecto Distrito Norte, siendo la continuidad del Yacimiento Las Marías, aprobado en el Proyecto Distrito Norte. El proyecto, no considera cambios en las instalaciones ya aprobadas, ni en el origen de los suministros; su alcance solo se remite a la explotación de una mayor superficie, al interior de la misma área del proyecto Distrito Norte.

Al igual que el Proyecto Distrito Norte, el destino final de los minerales explotados, será abastecer la Planta de Beneficio del Proyecto Mantos de la Luna; conforme a lo señalado en la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) denominada "Segunda Modificación Proyecto Mantos de la Luna" aprobado por Resolución de Calificación Ambiental, RCA N°0145/2013 de fecha 14 de junio de 2013.

En general, respecto de la explotación minera, el presente proyecto no considera minas nuevas, sino que amplía la explotación minera aumentando las dimensiones tanto del Rajo Las Marías como de la Mina Subterránea Las Marías, ambas aprobadas en el proyecto original. Este crecimiento, a partir de una recategorización de los recursos mineros del proyecto y aumento de las reservas; permiten aumentar la tasa de explotación y darle una mayor vida útil al proyecto. En este tenor, y con fin de depositar los nuevos estériles, es que el Botadero Las Marías se amplía, mientras que el Botadero Sur Las Marías se reubica y amplia.

Respecto del El Proyecto, el Rajo Las Marías mantiene la explotación mediante el método de Rajo Abierto, mientras que la Mina Subterránea Las Marías mantiene su explotación mediante SubLevel Stoping, complementando eventualmente con Room and Pillar. Ambas explotaciones se encuentran amparadas por concesiones mineras de la titular del Proyecto. De esta manera, mediante el traslado de mineral en camiones, se proyecta abastecer de minerales de cobre a la planta de beneficio de minerales de proyecto Mantos de la Luna; contribuyendo a la producción total de dicha planta, que busca alcanzar una producción de 28.000 toneladas de cátodos al año. La explotación se hará a una razón promedio de 1.800.000 toneladas de mineral al año, durante un período de 29 años incluida la fase de cierre.

El objetivo del presente informe es cuantificar las tasas de emisiones de material particulado (MP10, MP2,5) y material particulado sedimentables (MPS), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x), Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) y amoníaco (NH_3), que generará el Proyecto en cada una de sus fases, para ello se utilizarán las metodologías indicadas en el "Informe Final Servicio de recopilación de factores de emisión al aire para el Servicio de Evaluación Ambiental", en la "Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas para la Región Metropolitana, Junio 2020",

basada en el compilado "AP 42, Fifth Edition, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, United States" de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y en "Emission Inventory Guidebook. Ch. 2.A.5.b Construction and demolition – 2019" de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EMEP/EEA).

De acuerdo con lo establecido en la normativa ambiental vigente, en particular el D.S. N.° 40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente, los proyectos sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental deben presentar la identificación, descripción y cuantificación de emisiones para todas sus fases: construcción, operación y cierre. No obstante, en el presente caso, la evaluación se circunscribe exclusivamente a la fase de operación del proyecto.

Lo anterior se justifica en razón de que esta evaluación corresponde a una modificación de proyecto que ya cuenta con las instalaciones propias de la fase de operación construidas y autorizadas previamente. Por tanto, no se incorporan nuevas obras civiles ni actividades constructivas que impliquen un análisis adicional de emisiones en esa fase. Asimismo, la modificación no contempla cambios respecto a la fase de cierre, la cual fue evaluada y aprobada en la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) del proyecto original. En este contexto, el presente informe presenta únicamente las emisiones asociadas a los cambios propuestos para la fase de operación del Proyecto Distrito Norte.

2 Estimación de emisiones del proyecto

2.1 Ecuación general para el cálculo de emisiones

La metodología utilizada para estimar las emisiones atmosféricas generadas por el Proyecto, corresponde a la señalada en los documentos "Informe Final servicio de recopilación de factores de emisión al aire para el Servicio de Evaluación Ambiental" (2015) y "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana, 2020" de la Seremi del Medio Ambiente RM, los que a su vez se basan en el documento "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP42" de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA).

La ecuación general empleada para la estimación de emisiones corresponde a la siguiente:

$$E_i = fe \quad * Na_n * \left(1 - \frac{Ea_n}{100}\right) (Ec. 1)$$

Dónde,

E_i = Emisión del contaminante i.
fe = Factor de emisión del contaminante i. en el proceso n.
Na_n = Nivel de actividad del proceso n.
Ea_n = Eficiencia de abatimiento del proceso n [%].

Las emisiones serán estimadas sobre una base anual (año cronológico: 12 meses corridos) de acuerdo con la programación para la realización de las distintas actividades del Proyecto, en toneladas por año.

2.2 Actividades o fuentes de emisión

A continuación, se presenta un listado de las principales actividades o fuentes de emisiones atmosféricas del Proyecto, especificando el tipo de contaminante asociado.

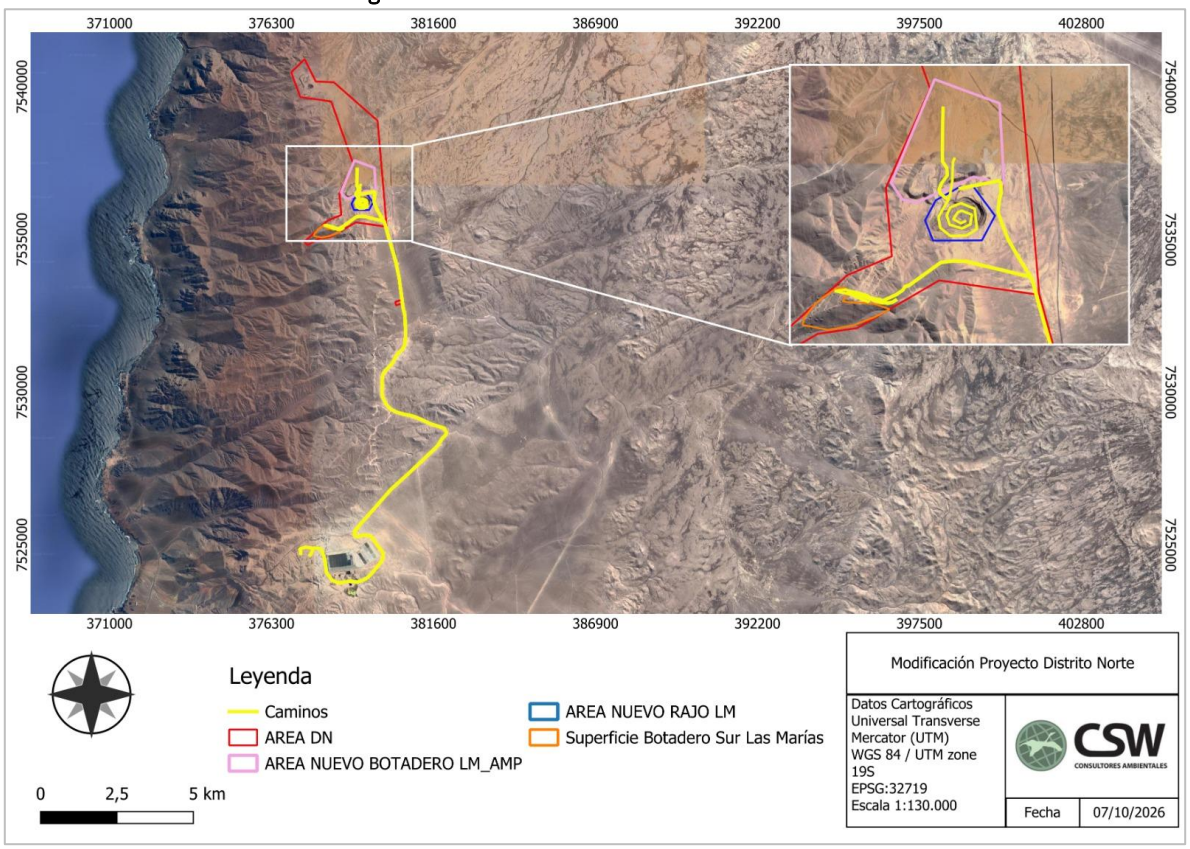
Tabla 1. Actividades generadoras de emisiones

Fase	Actividad	Contaminantes
Operación	Combustión motores maquinaria fuera de ruta	MP10 – MP2,5 – MPS – NO_x – SO_x– NH_3 - CO - COVs
	Tránsito de vehículos por caminos no pavimentados	MP10 - MP2,5 – MPS
	Combustión motores de vehículos de transporte	MP10 – MP2,5 – MPS – NO_x – SO_x– NH_3 - CO - COVs
	Perforaciones	MP10 - MP2,5 – MPS
	Movimiento de tierra	MP10 - MP2,5 – MPS
	Zona de acopio o almacenamiento de tierra	MP10 - MP2,5 – MPS
	Tronaduras	MP10 - MP2,5 – MPS
Cierre	Combustión motores maquinaria fuera de ruta	MP10 – MP2,5 – MPS – NO_x – SO_x– NH_3 - CO - COVs
	Combustión motores de vehículos de transporte	MP10 – MP2,5 – MPS – NO_x – SO_x– NH_3 - CO - COVs
	Tránsito de vehículos por caminos no pavimentados	MP10 - MP2,5 – MPS
	Movimiento de tierra	MP10 - MP2,5 – MPS

Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes entregados por el Titular, 2025.

Mientras que las rutas recorridas por los vehículos se ven reflejadas en la Figura N°1. Todas corresponden a caminos no pavimentados. Además, se adjunta al presente informe en el Apéndice 1 el KMZ con el desglose e identificación de las rutas consideradas.

Figura 1. Rutas de referencia de los vehículos

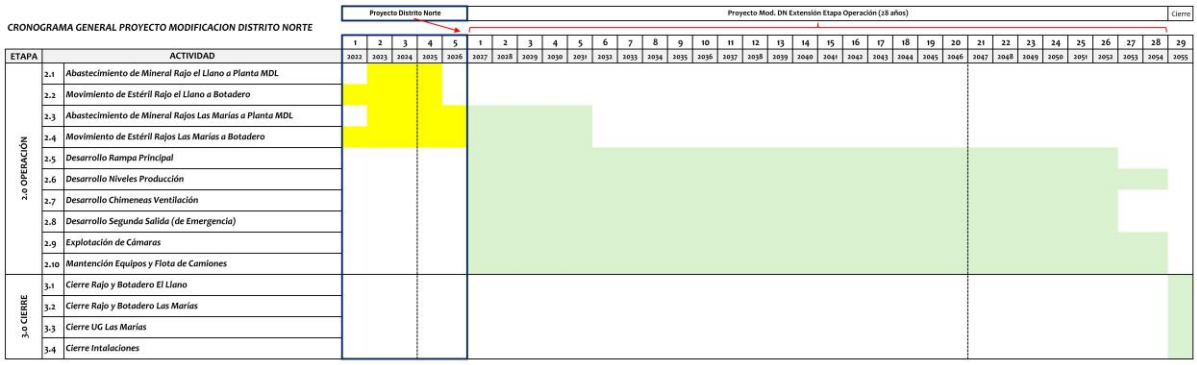


Fuente: Elaboración propia, 2026

2.3 Cronograma general

A continuación, se presenta el cronograma de las actividades del Proyecto para cada una de sus fases.

Tabla 2. Cronograma general



Fuente: Elaboración propia, en base a antecedentes entregados por el Titular, 2025.

2.4 Cronograma de las actividades emisoras

A continuación, se presentan los cronogramas para las actividades emisoras de contaminantes atmosféricos en las fases de operación y cierre del Proyecto.

Tabla 3. Cronograma actividades fase de operación

Actividad	Meses (Primer año fase operación)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Combustión motores maquinaria fuera de ruta												
Combustión motores de vehículos de transporte												
Tránsito de vehículos por caminos no pavimentados												
Perforaciones												
Movimiento de tierra												
Zona de acopio o almacenamiento de tierra												
Tronaduras												

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Tabla 4. Cronograma actividades fase de cierre

Actividad	Meses
	1
Combustión motores maquinaria fuera de ruta	
Combustión motores de vehículos de transporte	
Tránsito de vehículos por caminos no pavimentados	
Movimiento de tierra	

Fuente: Elaboración propia, 2025.

2.5 Cálculo de emisiones de fase de operación

2.5.1 Emisiones por combustión de maquinaria fuera de ruta

La metodología ocupada se basa en el documento "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002), que aporta con la fórmula general de obtención de emisiones, y en segundo lugar, en el capítulo "1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), que aporta con factores de emisión y parámetros actualizados.

2.5.1.1 Factores de emisión

Para determinar las emisiones generadas por la combustión de maquinaria fuera de ruta se considera la siguiente ecuación:

$$E_{i,j} = h_i * P_i * (1 + FD_i) * FC_i * TAF_i * FE_{Basei,j}$$

Dónde,

$E_{i,j}$: Emisiones del contaminante j, de la maquinaria i, en [g/año].

h_i: Horas de utilización de la maquinaria i, en [h/año].

Pi: Potencia del tipo de maquinaria i, en [kW].

FD_i: Factor de deterioro de la maquinaria i, adimensional.

FC_i: Factor de carga de la maquinaria i, adimensional.

TAF_i: Factor de ajuste transiente de la maquinaria i, adimensional.

FE_{Base}: Factor de emisión del contaminante j, de la maquinaria i, en [g/kWh]

A su vez, el Factor de Deterioro (FD), está dado por una relación entre la vida útil de la maquinaria y la edad de la maquinaria.

$$FD = \frac{k}{VU} * FD_{VU}$$

Dónde:

k: Edad de la maquinaria (entre 0 y la vida útil), en años.

VU: Vida útil de la maquinaria, en años.

FD_{VU}: Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria.

El Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria (FD_{VU}) queda dado por la siguiente tabla a continuación:

Tabla 5. Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria

Tecnología	MP	NOx	CO	COVs
Previo a stage I	0,473	0,024	0,185	0,047
Stage I	0,473	0,024	0,101	0,036
Stage II	0,473	0,009	0,101	0,034
Stage IIIA, posteriores	0,473	0,008	0,151	0,027

Fuente: Tabla 3-11 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002).

Con respecto a la edad de la maquinaria, se considerará una antigüedad 8 años. Por lo tanto, el Factor de deterioro para cada maquinara son los siguientes:

Tabla 6. Factor de deterioro maquinaria

Maquinaria	k	VU	FD MP	FD NOx	FD CO	FD COVs
Excavadora	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Cargador frontal	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Motoniveladora	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Bulldozer	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Perforadora	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Cargador frontal des	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Cargador frontal prod	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Jumbo Epi Roc	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
DTH Epi Roc	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Simba Epi Roc	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Acuñador	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Equipo levante	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Mixer	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
Robocon shotcret	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

Para el Factor de carga (FC), en base a lo señalado en la "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi del Medio Ambiente RM, 2020) y según lo señalado por Caterpillar (2017), considerando un escenario conservador, se debe utilizar un valor de 0,8 para todas las maquinarias fuera de ruta.

Para el factor de ajuste transiente (TAF), se aplicarán los valores presentados en la siguiente tabla según corresponda:

Tabla 7. Factor de ajuste transiente

TAF	MP	NOx	CO	COVs
Stage II y previos	1,23	0,95	1,53	1,05
Stage IIIA	1,470	1,040	1,530	1,050
Stage IIIB-V	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: Tabla 3-14 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" EPA, 2002.

Respecto al Factor de emisión base (FEbase), según señalado en la "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana" (Seremi del Medio Ambiente RM, 2020) y de

acuerdo con lo señalado en y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002) y en "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), se considerarán lo siguientes factores, teniendo en cuenta la potencia de la maquinaria:

Tabla 8. Factor de emisión base operación de maquinaria

Maquinaria	FEb MP	FEb NOx	FEb SO_2	FEb NH_3	FEb CO	FEb COVs
EXCAVADORA, KOMATSU PC2000	0,05	3,5	0,01	0,002	1,5	1,4
CARGADOR FRONTAL, CAT 950	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
MOTONIVELADORA, CAT 160M	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
BULLDOZER, CAT D8T	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
PERFORADORA, EPIROC ROC L8	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
CARGADOR FRONTAL (des. y prod.), VOLVO L120	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
JUMBO EPIROC 282	0,2	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
DTH EPIROC 1254	0,2	3,81	0,01	0,002	2,2	0,4
SIMBA EPIROC 282	0,1	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
ACUÑADOR (Jdeere 310)	0,25	0,4	0,01	0,002	2,2	0,28
EQUIPO LEVANTE JCV	0,25	0,4	0,01	0,002	2,2	0,28
MIXER (Putzmeister)	0,2	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3
ROBOSHOTCRET (Putzmeister)	0,2	3,24	0,01	0,002	1,5	0,3

Fuente: Tabla 3-6 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la RM (Seremi del Medio Ambiente, 2020) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" EPA, 2002.

2.5.1.2 Nivel de actividad fase operación

El nivel de actividad corresponde a las horas de utilización de cada maquinaria usada en el Proyecto durante la fase de operación:

Tabla 9. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 1 al 3 Rajo

Maquinaria	Potencia (kW)	Cantidad	Horas de funcionamiento fase operación (h/fase)
EXCAVADORA, KOMATSU PC2000	728	2	13140
CARGADOR FRONTAL, CAT 950	188	1	5256
MOTONIVELADORA, CAT 160M	159	1	4380
BULLDOZER, CAT D8T	271	1	4380
PERFORADORA, EPIROC ROC L8	328	2	9124

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

Tabla 10. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 1 al 5 UG

Maquinaria	Potencia (kW)	Cantidad	Horas de funcionamiento fase operación (h/fase)
CARGADOR FRONTAL (des), VOLVO L120	203	2	13140
CARGADOR FRONTAL (prod), VOLVO L120	203	2	13140
JUMBO EPIROC 282	125	4	26280
DTH EPIROC 1254	70	2	13140
SIMBA EPIROC 282	125	3	19710
ACUÑADOR (Jdeere 310)	69	3	15768
EQUIPO LEVANTE JCV	64	4	21024
MIXER (Putzmeister)	130	1	4380
ROBOCONSHOTCRET (Putzmeister)	37	1	4380

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

Tabla 11. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase operación año 6 al 28 UG

Maquinaria	Potencia (kW)	Cantidad	Horas de funcionamiento fase operación (h/fase)
CARGADOR FRONTAL (des), VOLVO L120	203	2	10950
CARGADOR FRONTAL (prod), VOLVO L120	203	2	10950
JUMBO EPIROC 282	125	4	21900
DTH EPIROC 1254	70	2	10950
SIMBA EPIROC 282	125	3	16425
ACUÑADOR (Jdeere 310)	69	3	13140
EQUIPO LEVANTE JCV	64	4	17520
MIXER (Putzmeister)	130	1	3650

Maquinaria	Potencia (kW)	Cantidad	Horas de funcionamiento fase operación (h/fase)
ROBOSHOTCRET (Putzmeister)	37	1	3650

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

2.5.1.3 Emisiones por año fase operación

Considerando los parámetros del factor de emisión y el nivel de actividad de cada maquinaria para la fase de operación del Proyecto, se estima que se generarán las siguientes cantidades de contaminantes debido a la operación de maquinaria fuera de ruta:

Tabla 12. Emisiones maquinaria fase operación año 1 al 3 y año 1 al 5 (t/año)

Maquinaria	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
EXCAVADORA, KOMATSU PC2000	0,4747	0,4747	0,4747	26,9560	0,0574	0,0153	12,8658	10,9452
CARGADOR FRONTAL, CAT 950	0,1602	0,1602	0,1602	2,6807	0,0059	0,0016	2,0334	0,2544
MOTONIVELADORA, CAT 160M	0,1129	0,1129	0,1129	1,8893	0,0042	0,0011	1,4331	0,1793
BULLDOZER, CAT D8T	0,1924	0,1924	0,1924	3,2202	0,0071	0,0019	2,4426	0,3056
PERFORADORA, EPIROC ROC L8	0,4851	0,4851	0,4851	8,1189	0,0180	0,0048	6,1583	0,7704
Total año 1 al 3 Rajo	**1,4253**	**1,4253**	**1,4253**	**42,8652**	**0,0926**	**0,0247**	**24,9331**	**12,4549**
CARGADOR FRONTAL (des), VOLVO L120	0,3618	0,3618	0,3618	6,6103	0,0160	0,0043	5,4890	0,6605
CARGADOR FRONTAL (prod), VOLVO L120	0,3618	0,3618	0,3618	6,6103	0,0160	0,0043	5,4890	0,6605
JUMBO EPIROC 282	1,0650	1,0650	1,0650	8,9120	0,0202	0,0053	6,7598	0,8457
DTH EPIROC 1254	0,2982	0,2982	0,2982	2,9344	0,0057	0,0015	2,7760	0,3157
SIMBA EPIROC 282	0,3994	0,3994	0,3994	6,6840	0,0148	0,0039	5,0699	0,6343
ACUÑADOR (Jdeere 310)	0,4409	0,4409	0,4409	0,3644	0,0068	0,0017	3,2837	0,2614
EQUIPO LEVANTE JCV	0,5453	0,5453	0,5453	0,4507	0,0084	0,0022	4,0609	0,3233
MIXER (Putzmeister)	0,1846	0,1846	0,1846	1,5447	0,0035	0,0009	1,1717	0,1466
ROBOSHOTCRET (Putzmeister)	0,0525	0,0525	0,0525	0,4397	0,0010	0,0003	0,3335	0,0417
Total año 1 al 5 UG	**3,7095**	**3,7095**	**3,7095**	**34,5504**	**0,0925**	**0,0243**	**34,4335**	**3,8898**
TOTAL AÑO 1 AL 3 SUMATORIA RAJO Y UG	**5,1347**	**5,1347**	**5,1347**	**77,4155**	**0,1850**	**0,0489**	**59,3665**	**16,3447**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002), EMEP/EEA (2019) y Seremi del Medio Ambiente RM (2020).

Tabla 13. Emisiones maquinaria fase operación año 6 al 28 (t/año)

Maquinaria	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
CARGADOR FRONTAL (des), VOLVO L120	0,3015	0,3015	0,3015	5,5086	0,0133	0,0036	4,5742	0,5505
CARGADOR FRONTAL (prod), VOLVO L120	0,3015	0,3015	0,3015	5,5086	0,0133	0,0036	4,5742	0,5505
JUMBO EPIROC 282	0,8875	0,8875	0,8875	7,4267	0,0169	0,0044	5,6332	0,7048
DTH EPIROC 1254	0,2485	0,2485	0,2485	2,4453	0,0048	0,0012	2,3134	0,2631
SIMBA EPIROC 282	0,3328	0,3328	0,3328	5,5700	0,0123	0,0033	4,2249	0,5286
ACUÑADOR (Jdeere 310)	0,3674	0,3674	0,3674	0,3037	0,0057	0,0015	2,7364	0,2179
EQUIPO LEVANTE JCV	0,4544	0,4544	0,4544	0,3756	0,0070	0,0018	3,3841	0,2694
MIXER (Putzmeister)	0,1538	0,1538	0,1538	1,2873	0,0029	0,0008	0,9764	0,1222
ROBOSHOTCRET (Putzmeister)	0,0438	0,0438	0,0438	0,3664	0,0008	0,0002	0,2779	0,0348
TOTAL ANUAL PARA LOS AÑOS 6 AL 28	**3,0912**	**3,0912**	**3,0912**	**28,7920**	**0,0770**	**0,0202**	**28,6946**	**3,2415**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002), EMEP/EEA (2019) y Seremi del Medio Ambiente RM (2020).

2.5.2 Emisiones por combustión de vehículos

Para la estimación de las emisiones atmosféricas producto de la combustión interna de vehículos, se utilizarán los factores de emisión presentados en EMEP/EEA, 2019, en particular, los señalados en la sección 3.3 "Tier 2 Method". Estos factores dependen de la categoría vehicular, del tipo de combustible, cilindrada, peso, y de la normativa de emisiones. Mientras que los cálculos se han dividido en 3; Año del 1 al 3 para extracción en el Rajo, extracción año del 1 al 5 extracción subterránea (UG) y del 6 al 28 Ampliación Mina Subterránea Las Marías (UG).

2.5.2.1 Factores de emisión

Para el cálculo de las emisiones generadas a partir de los motores de los vehículos de transporte que se ocuparán durante la fase de operación del Proyecto, se consideran los siguientes factores de emisión de acuerdo con el tipo de vehículo:

Tabla 14. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km)

Vehículo	MP10	MP2,5	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Vehículos livianos Diesel <3,5 [t] Euro VI	0,0009	0,0009	0,49	0,0024	0,0019	0,075	0,035
Vehículos pesados diesel<7,5 Euro VI	0,0008	0,0008	0,291	0,0047	0,011	0,071	0,008
Vehículos pesados Diesel Diésel >32 [t] Euro IV	0,03	0,03	4,61	0,01	0,03	0,12	0,01

Fuente: "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.3.b Road Transport (EMEP/EEA, 2019).

2.5.2.2 Nivel de actividad

El nivel de actividad de las emisiones por la combustión de los motores de vehículos viene dado por la cantidad de kilómetros que estos recorren durante la fase de operación, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 15. Distancia recorrida vehículos (Km)

Año	Tipo de Vehículo	Viajes ida y vuelta (anual)	Distancia recorrida por viaje (Km)	Distancia total recorrida (Km)	Rutas
Año 1 al 3	CAEX, CAT 777F	61153	2,5	152883	Rajo-Botadero
	Camión Batea, MBENZ NEW ACTROS 1840	7300	14,5	105850	Rajo-Planta
	Camioneta, Mitsubishi L200	3650	2	7300	Caminos Proyecto
	Camión Fábrica, MACK	292	19,7	5752	Rajo-Patio Nitratos
	Camión, Chevrolet NPR	292	20	5840	Rajo-Polvorín
	Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	1460	17,9	26134	Caminos Proyecto
Año del 1 al 5 UG	Camión Tolva, MBenz Actros 4144	21900	1	21900	UG-Botadero
	Camión Tolva, MBenz Actros 4144	14600	14,5	211700	UG-Planta
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	3650	2	7300	Caminos Proyecto
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	292	2	584	Interior mina
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi	292	20	5840	Polvorin-UG

Año	Tipo de Vehículo	Viajes ida y vuelta (anual)	Distancia recorrida por viaje (Km)	Distancia total recorrida (Km)	Rutas
	L200				
	Camión Aljibe, Mbenz Actros 4144	1460	17,9	26134	Caminos Proyecto
Año del 6 al 28 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	7300	1	7300	UG-Botadero
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	14600	14,5	211700	UG-Planta
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	1460	2	2920	interior mina
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	292	2	584	interior mina
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	730	20	14600	Polvorín-UG
	Camion Aljibe, Mbenz Actros 4144	1460	17,85	26061	interior mina-Cachimba

Fuente: Elaboración propia en base a EMEP/EEA, 201

2.5.2.3 Emisiones fase operación

Las emisiones totales producto de la combustión de los motores de los vehículos que se utilizarán en la fase de operación del Proyecto resultan de:

Tabla 16. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase operación años del 1 al 5 (t/año)

Año	Tipo vehículo	Emisiones (t/año)							
		MP10	MP2,5	MPS	NOx	SO2	NH_3	CO	COVs
Del 1 al 3 Rajo	CAEX , CAT 777F	0,00410	0,00410	0,00410	0,70479	0,00115	0,00443	0,01850	0,00183
	Camión Batea, MBENZ NEW ACTROS 1840	0,00284	0,00284	0,00284	0,48797	0,00079	0,00307	0,01281	0,00127
	Camioneta, Mitsubishi L200	0,00001	0,00001	0,00001	0,00358	0,00002	0,00001	0,00055	0,00026
	Camión Fábrica, MACK	0,00015	0,00015	0,00015	0,02652	0,00004	0,00017	0,00070	0,00007
	Camión, Chevrolet NPR	0,00000	0,00000	0,00000	0,00170	0,00003	0,00006	0,00041	0,00005
	Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	0,00070	0,00070	0,00070	0,12048	0,00020	0,00076	0,00316	0,00031
Total anual rajo para los años 1 al 3		**0,00781**	**0,00780**	**0,00781**	**1,34503**	**0,00222**	**0,00851**	**0,03613**	**0,00379**
Año del 1 al 5 UG	Camión Tolva, MBenz Actros 4144	0,00059	0,00059	0,00059	0,10096	0,00016	0,00064	0,00265	0,00026
	Camión Tolva, MBenz Actros 4144	0,00567	0,00567	0,00567	0,97594	0,00159	0,00614	0,02562	0,00254
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	0,00001	0,00001	0,00001	0,00358	0,00002	0,00001	0,00055	0,00026
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	0,000001	0,000001	0,000001	0,00029	0,000001	0,000001	0,00004	0,00002
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	0,00001	0,00001	0,00001	0,00286	0,00001	0,00001	0,00044	0,00020

Año	Tipo vehículo	Emisiones (t/año)							
		MP10	MP2,5	MPS	NOx	SO2	NH_3	CO	COVs
	Camion Aljibe, Mbenz Actros 4144	0,00070	0,00070	0,00070	0,12048	0,00020	0,00076	0,00316	0,00031
Total anual UG para los años 1 al 5		0,00697	0,00697	0,00697	1,20410	0,00198	0,00756	0,03246	0,00360
TOTAL ANUAL PARA LOS PRIMEROS 3 AÑOS (suma emisiones rajo y subterráneo)		0,014781	0,014773	0,014781	2,549128	0,004206	0,016064	0,068584	0,007387

Fuente: Elaboración propia 2026.

Tabla 17. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase operación años del 6 al 28 (t/año)

Año	Tipo vehículo		Emisiones (t/año)						
		MP10	MP2,5	MPS	NOx	SO2	NH_3	CO	COVs
Año del 6 al 28 UG	Camión Tolva MBenz Actros 4144	0,00020	0,00020	0,00020	0,03365	0,00005	0,00021	0,00088	0,00009
	Camión Tolva MBenz Actros 4144	0,00567	0,00567	0,00567	0,97594	0,00159	0,00614	0,02562	0,00254
	Camioneta Mitsubishi L200	0,00000	0,00000	0,00000	0,00143	0,00001	0,00001	0,00022	0,00010
	Camioneta Mitsubishi L200	0,000001	0,000001	0,000001	0,00029	0,000001	0,000001	0,00004	0,00002
	Camioneta Mitsubishi L200	0,00001	0,00001	0,00001	0,00715	0,00004	0,00003	0,00110	0,00051
	Camion Aljibe, Mbenz Actros 4144	0,00070	0,00070	0,00070	0,12014	0,00020	0,00076	0,00315	0,00031
TOTAL ANUAL PARA LOS AÑOS 6 AL 28		**0,00658**	**0,00658**	**0,00658**	**1,13860**	**0,00188**	**0,00714**	**0,03101**	**0,00357**

Fuente: Elaboración propia 2025.

2.5.3 Emisiones por tránsito de vehículos por vías no pavimentadas

Cuando un vehículo transita por un camino no pavimentado, la fuerza de las ruedas produce pulverización de las partículas superficiales, las cuales son levantadas por el movimiento rotatorio de las ruedas en combinación con la turbulencia generada por el paso del vehículo. Para determinar las emisiones generadas por el Proyecto en la fase de operación se utilizará la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.2 Unpaved Roads" (EPA, 2006a).

2.5.3.1 Factores de emisión

Se establece el siguiente factor de emisión para la circulación de vehículos por caminos no pavimentados industriales dominados por vehículos pesados:

$$fe = k * 281{,}9 * \left(\frac{s}{12}\right)^{0{,}9} \left(\frac{W}{2{,}72}\right)^{0{,}45} \left(\frac{g}{Km}\right) (Ec.5)$$

Dónde,

k: 1,5 (g/Km) para MP10, 0,15 (g/Km) para MP2,5 y 4,9 para MPS.
s: contenido de material fino en la superficie [%]. Valor por defecto: 8,5.
W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t].

El peso promedio de la flota, para un determinado camino no pavimentado y año cronológico, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{\sum_i^n [P_i N v_i]}{\sum_j^n N v_j} (Ec.6)$$

Dónde,

W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t].
$\underline{P_i}$: Promedio entre el peso con y sin carga (en [t]), del vehículo que hace un determinado tipo de viaje i. Por ejemplo, un tipo de viaje puede ser el traslado de escombros en el año 1 del proyecto.
Nv_i: Número de viajes del tipo de viaje i, en el año cronológico en cuestión.
Nv_j: Número de viajes del tipo de viaje j, en el año cronológico en cuestión.
n: Cantidad de tipos de viajes en el año cronológico en cuestión.

Considerando todos los vehículos que transitarán por el camino no pavimentado, se determinó un peso promedio (W). Los parámetros obtenidos y los factores de emisión se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 18. Parámetros y factores de emisión para caminos no pavimentados

		k			Factores de emisión (g/Km)		
Año	W	MP10	MP2.5	MPS	MP10	MP2.5	MPS
1 al 3 Rajo	104	1,5	0,15	4,9	1596	160	5213
1 al 5 UG	26	1,5	0,15	4,9	857	86	2798
6 al 28 UG	26	1,5	0,15	4,9	860	86	2809

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2006a).

El parámetro W fue calculado con los siguientes a partir de los siguientes valores de los pesos de cada vehículo.

Tabla 19. Pesos vehículos

Año	Vehículo	Peso bruto (t)	Peso con carga (t)	Peso promedio Pi (t)	Nv_i	Nv_{ij}	Nvi*Pi
1 al 3 Rajo	CAEX (estéril), CAT 777F	74,00	164,00	119	30577	30577	3638604
	Camión Batea (mineral), MBENZ NEW ACTROS 1840	15,60	65,60	41	3650	3650	148190
	Camioneta, Mitsubishi L200	1,90	1,90	2	1825	1825	3468
	Camión Fábrica (explosivos), MACK	23,30	53,30	38	146	146	5592
	Camión Polvorín, Chevrolet NPR	8,40	13,40	11	146	146	1591
	Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	50,00	80,00	65	730	730	47450
TOTAL 1 al 3 Rajo						37073,5	3844894
1 al 5 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	11,00	46,00	28,50	10950	10950	312075
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	11,00	46,00	28,50	7300	7300	208050
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	1,90	2,50	2,20	1825	1825	4015
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	1,90	2,50	2,20	146	146	321,2
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	2,40	3,10	2,75	146	146	401,5
	Camión Aljibe, Mbenz Actros 4144	17,50	48,50	33,00	730	730	24090

TOTAL 1 al 5 UG						**21097**	**548953**
6 al 28 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	11,00	46,00	28,50	3650	3650	104025
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	11,00	46,00	28,50	7300	7300	208050
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	1,90	2,50	2,20	730	730	1606
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	1,90	2,50	2,20	146	146	321
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	2,40	3,10	2,75	365	365	1004
	Camión Aljibe, Mbenz Actros 4144	17,50	48,50	33,00	730	730	24090
TOTAL 6 al 28 UG						**12921**	**339095, 95**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2006a).

2.5.3.2 Nivel de actividad

Los niveles de actividad para cada vehículo en la fase de operación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 20. Nivel de actividad tránsito de vehículos por vías no pavimentadas fase operación

Año	Tipo de Vehículo	NO Pavimentado trayecto [km]	Total Viajes (ida y vuelta) anual	Distancia total NO pavimentada recorrida (Km)	Ruta
1 al 3 Rajo	CAEX (estéril), CAT 777F	2,5	61153,00	152882,50	Rajo-Botadero
	Camión Batea (mineral), MBENZ NEW ACTROS 1840	14,5	7300	105850	Rajo-Planta
	Camioneta, Mitsubishi L200	2	3650	7300	Caminos Proyecto
	Camión Fábrica (explosivos), MACK	19,7	292	5752,4	Rajo-Patio Nitratos
	Camión Polvorín, Chevrolet NPR	20	292	5840	Rajo-Polvorín
	Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	17,9	1460	26134	Caminos Proyecto
1 al 5 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	1	21900	21900	UG-Botadero
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	14,5	14600	211700	UG-Planta
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	2	3650	7300	Caminos Proyecto
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	2	292	584	Interior mina
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	20	292	5840	Polvorín-UG
	Camión Aljibe, Mbenz Actros 4144	17,9	1460	26134	Caminos Proyecto
6 al 28 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	1	7300	7300	UG-Botadero
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	14,5	14600	211700	UG-Planta

Año	Tipo de Vehículo	NO Pavimentado trayecto [km]	Total Viajes (ida y vuelta) anual	Distancia total NO pavimentada recorrida (Km)	Ruta
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	2	1460	2920	Caminos proyecto
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	2	292	584	Caminos Proyecto
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	20	730	14600	Polvorín-UG
	Camión Aljibe, Mbenz Actros 4144	17,9	1460	26061	Interior mina-Cachimba

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2011).

Humectación:

Basándose en la metodología descrita en el documento "Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures" (EPA, 1992), la ecuación empleada para determinar la eficiencia de control de la humectación en caminos no pavimentados se presenta a continuación:

$$C = 100 - \frac{0{,}8 * p * d * t}{i} \ (\%)$$

Dónde:

C : Porcentaje de efectividad de la humectación (%)

p : Evaporación potencial promedio (mm/h).

d : Flujo horario en caminos sin pavimentar (veh/h).

t : Tiempo entre aplicaciones.

i : Tasa de aplicación riego (L/m^2)

Específicamente, en el contexto del Proyecto, los parámetros que conforman la ecuación de eficacia de humectación son los siguientes:

Tabla 21. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km)

Vehículo	Valor	Unidad
C	75	%
p *	0,33	mm/h
d	7	veh/h
i	0,548	L/m^2
t	7,4	h

Nota: La evaporación potencial fue calculada con los datos de la estación Tocopilla para los meses con mayor evaporación (Dirección Meteorológica de Chile, 2026)

En relación a la tasa de aplicación del riego, considerando que el camión aljibe a emplear cuenta con una capacidad de 20.000 litros, para alcanzar una eficiencia del 75% en la supresión del polvo, considerando un escenario desfavorable con un flujo vehicular de 7 veh/h, es necesario implementar la estrategia de humectación cada 7,4 horas como máximo. Para ello, se prevé **aplicar la humectación como mínimo 2 veces al día** en la jornada de trabajo, abarcando así todas las superficies de los caminos no pavimentados que serán utilizadas durante la jornada laboral diaria.

2.5.3.3 Emisiones fase operación

Considerando los factores de emisión, nivel de actividad y factor de corrección anteriormente descrito, se detalla a continuación las emisiones producto del tránsito de vehículos por vías no pavimentadas.

Tabla 22. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas

Año	Vehículo	MP10 (t/año)	MP2.5 (t/año)	MPS (t/año)
1 al 3 Rajo	CAEX (estéril), CAT 777F	60,9904	6,0990	199,2353
	Camión Batea (mineral), MBENZ NEW ACTROS 1840	42,2274	4,2227	137,9429
	Camioneta, Mitsubishi L200	2,9122	0,2912	9,5133
	Camión Fábrica (explosivos), MACK	2,2948	0,2295	7,4965
	Camión Polvorín, Chevrolet NPR	2,3298	0,2330	7,6106
	Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	10,4258	1,0426	34,0576
Total anual años 1 al 3 Rajo		**121,1805**	**12,1180**	**395,8562**
1 al 5 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	4,6894	0,4689	15,3188
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	45,3311	4,5331	148,0817
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	1,5631	0,1563	5,1063
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	0,1251	0,0125	0,4085
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	1,2505	0,1251	4,0850
	Camion Aljibe, Mbenz Actros 4144	5,5960	0,5596	18,2804
Total anual 1 al 5 UG		**58,5553**	**5,8555**	**191,2807**
TOTAL ANUAL PARA LOS PRIMEROS 3 AÑOS (suma emisiones rajo y subterráneo)		***179,735777***	***17,9736***	***587,136871***

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006a.

Tabla 23. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas años del 6 al 28

Año	Vehículo	MP10 (t/año)	MP2.5 (t/año)	MPS (t/año)
6 al 28 UG	Camión Tolva (estéril), MBenz Actros 4144	1,5692	0,1569	5,1259
	Camión Tolva (mx), MBenz Actros 4144	45,5058	4,5506	148,6524
	Camioneta O&M, Mitsubishi L200	0,6277	0,0628	2,0504
	Camioneta Servicios, Mitsubishi L200	0,1255	0,0126	0,4101
	Camioneta Explosivos, Mitsubishi L200	3,1383	0,3138	10,2519
	Camion Aljibe, Mbenz Actros 4144	5,6019	0,5602	18,2996
TOTAL ANUAL PARA LOS AÑOS 6 AL 28		56,5685	5,6568	184,7903

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006a.

2.5.4 Emisiones por perforaciones

Para calcular las emisiones por perforación se procederá según la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.11.9 Western surface coal mining"(EPA, 1998a).

2.5.4.1 Factores de emisión

Los factores de emisión definidos por la EPA son los siguientes:

Tabla 24. Factores de emisión por perforación

fe (Kg/N° perforaciones)		
MP10	MP2,5	MPS
0,177	0,02655	0,59

Fuente: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.11.9 Western surface coal mining" (EPA, 1998a).

2.5.4.2 Nivel de actividad

El Proyecto considera las siguientes perforaciones.

Tabla 25. Nivel de actividad perforaciones por año

Actividades		N° de perforaciones por año
Perforaciones Rajo Año 1 al 3		10368
Perforaciones año 1 al 5 UG	OPERACIÓN UG (desarrollo)	20448
	OPERACIÓN UG (producción)	9000
Perforaciones año 6 al 28 UG	OPERACIÓN UG (desarrollo)	6816
	OPERACIÓN UG (producción)	9000

Fuente: Elaboración propia.

2.5.4.3 Emisiones por año

Por lo tanto, considerando los factores de emisión y niveles de actividad correspondiente, las emisiones generadas por perforaciones en la fase de operación del Proyecto se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 26. Emisiones por perforaciones fase operación años del 1 al 5

Actividades	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
Perforaciones Año 1 al 3 Rajo	1,83514	0,27527	6,15859
Total anual años 1 al 3 Rajo	**1,83514**	**0,27527**	**6,15859**
Perforación UG (desarrollo) AÑO 1-5	3,61930	0,54289	12,14611
Perforación UG (producción) AÑO 1-5	1,59300	0,23895	5,34600
Total anual años del 1 al 5 UG	**5,21230**	**0,78184**	**17,49211**
Total anual años del 1 al 3 (sumatoria años 1 al 3)	**7,05**	**1,06**	**23,65**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Emisiones por perforaciones fase operación años del 6 al 28

Actividades	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
Perforación UG (desarrollo) AÑO 6 -28	1,2064	0,1810	4,0487
Perforación UG (producción) AÑO 6 -28	1,5930	0,2390	5,3460
Total anual años del 6 al 28 UG	**2,80**	**0,42**	**9,39**

Fuente: Elaboración propia.

2.5.5 Emisiones por movimiento de tierra

Corresponden a las emisiones producidas al momento de cargar o descargar el material excavado, escombros, etc. Para calcular estas emisiones se procederá según la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles" (EPA, 2006b).

2.5.5.1 Factores de emisión

Los factores de emisión definidos por la EPA son los siguientes:

$$fe_{MP10} = \frac{0{,}35 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.8)$$

$$fe_{MP2{,}5} = \frac{0{,}053 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.9)$$

$$fe_{MPS} = \frac{0{,}74 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.10)$$

Dónde,

U: velocidad del viento promedio: 5 m/s

M: Porcentaje de humedad del suelo, Valor por defecto: 6,5.

Por lo tanto, los factores de emisión resultantes son los siguientes.

Tabla 28. Factores de emisión por transferencia de material

fe (Kg/t)		
MP10	MP2,5	MPS
0,00031	0,00005	0,00066

Fuente: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles" EPA, 2006b.

2.5.5.2 Nivel de actividad

Corresponde a la cantidad de material transferido en cada operación de descarga en superficie, expresada en toneladas, de acuerdo con la metodología AP-42 de la U.S. EPA.

Tabla 29. Nivel de actividad carga y descarga material

Actividades	Volumen material (m^3)	Densidad (t/m^3)	Material total cargado y descargado (t)
OPERACIÓN RAJO (ESTERIL AÑOS 1-3)	3439833	1,6	5.503.733
OPERACIÓN RAJO (MINERAL AÑOS 1-3)	588542	1,6	941.667

Actividades	Volumen material (m^3)	Densidad (t/m^3)	Material total cargado y descargado (t)
OPERACIÓN UG (ESTERIL AÑO 1-5)	322500	1,6	516.000
OPERACIÓN UG (MINERAL AÑOS 1-5)	1125000	1,6	1.800.000
OPERACIÓN UG (ESTERIL AÑOS 6-28)	96875	1,6	155.000
OPERACIÓN UG (MINERAL AÑOS 6-28)	1125000	1,6	1.800.000

Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.5.5.3 Emisiones fase operación

Por lo tanto, considerando los factores de emisión y niveles de actividad correspondiente, las emisiones generadas por la carga y descarga de material se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 30. Emisiones por transferencia de material fase operación año 1 al 5

Actividades Movimiento de tierra	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
OPERACIÓN RAJO (ESTERIL AÑOS 1-3)	3,44152	0,52114	7,27636
OPERACIÓN RAJO (MINERAL AÑOS 1-3)	0,58883	0,08917	1,24496
Total Año 1 al 3 Rajo	**4,03035**	**0,61031**	**8,52131**
OPERACIÓN UG (ESTERIL AÑO 1-5)	0,16133	0,02443	0,34110
OPERACIÓN UG (MINERAL AÑOS 1-5)	0,56278	0,08522	1,18987
Total año 1 al 5 UG	**0,72410**	**0,10965**	**1,53096**
Total año 1 al 3 sumatoria de rajo y UG	**4,754454289**	**0,719960221**	**10,05227478**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006b.

Tabla 31. Emisiones por transferencia de material fase operación año 6 al 28

Actividades Movimiento de tierra	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
OPERACIÓN UG (ESTERIL AÑOS 6-28)	0,04846	0,00734	0,10246
OPERACIÓN UG (MINERAL AÑOS 6-28)	0,56278	0,08522	1,18987
Total año 6 al 28 UG	**0,61124**	**0,09256**	**1,29233**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006b.

2.5.6 Emisiones por acopio de tierra

2.5.6.1 Factores de emisión

Corresponde a las emisiones producidas por la erosión eólica del mineral y estéril apilado. La metodología para determinar las emisiones de esta actividad está basada en la "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana, 2020", la cual reúne información presentada en el documento "Fugitive Dust Handbook" Chapter 9. Storage Pile Wind Erosión" (WRAP, 2006).

Los factores de emisión definidos por la EPA son los siguientes:

$$fe_{MP} = k * \left(\frac{s}{1{,}5}\right)\left(\frac{f}{15}\right)\left(\frac{Kg}{hadía}\right) (Ec.14)$$

Dónde,

k: Parámetro según contaminante, para MP10 es de 0,953, para MP2.5 es de 0,146, y para MP30 es de 1,9, según documento "Fugitive Dust Handbook" Chapter 9. Storage Pile Wind Erosión" (WRAP, 2006).

s: Porcentaje de finos. Valor por defecto 8,5 %.

f: porcentaje del tiempo en que la velocidad del viento no obstruido es mayor a 5,4 [m/s] a la altura media de la pila.

Para considerar un escenario desfavorable, se consideró que para efectos del cálculo del factor de emisión, el parámetro f será de 5% en que velocidad del viento supera los 5,4 m/s, considerando información del Explorador Eólico (Ministerio de Energía, 2022).

Por lo tanto, los factores de emisión resultan:

Tabla 32. Factores de emisión erosión eólica material en pila

fe (Kg/h)		
MP10	MP2,5	MPS
1,80	0,28	3,59

Fuente: Elaboración propia con información de "Fugitive Dust Handbook, Ch. 2 Agricultural Tilling" (WRAP, 2006).

2.5.6.2 Nivel de actividad

El nivel de actividad para el material en pila se detalla a continuación:

Tabla 33. Nivel de actividad material en pila

Zona acopio mineral	Superficie zona acopio (ha)	Cantidad de días del material apilado
ESTERIL AMPLIAC. RAJO	79,5	365
ESTERIL UG	18,9	365

Fuente: Elaboración propia.

2.5.6.3 Emisiones fase operación

Considerando el nivel de actividad y los factores de emisión calculados previamente, se determinaron las siguientes emisiones generadas en la fase de operación para las zonas de acopio.

Tabla 34. Emisiones por acopio (t/año)

Actividades	Emisión (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
ESTERIL AMPLIAC. RAJO AÑO 1 AL 3	52,23472	8,00238	104,14058
ESTERIL UG AÑO 1 AL 28	12,41807	1,90245	24,75795
Total emisiones año 1 al 3, sumatorio rajo y UG	**64,65000**	**9,90483**	**128,89853**

Fuente: Elaboración propia.

2.5.7 Emisiones por tronaduras

Para calcular las emisiones por tronadura se procederá según la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.11.9 Western surface coal mining"(EPA, 1998a).

2.5.7.1 Factores de emisión

De acuerdo con la Tabla 11.9-2 del AP-42, el factor de emisión de material particulado total generado por tronaduras se determina mediante la siguiente expresión:

$$FE_{MPS} = 0{,}00022\ (A)^{1{,}5} \quad \text{(EC. 15)}$$

Dónde,

A: Corresponde al área horizontal (m^2), con profundidad de tronadura menor o igual a 21 m. En caso del Proyecto corresponde a 5000 m^2 por tronadura

La EPA establece además factores de escalamiento para determinar las fracciones correspondientes a MP10 y MP2,5 a partir del material particulado total generado:

$$FE_{MP\ 10} = FE_{MPS} * 0{,}52 \quad \text{(EC. 16)}$$

$$FE_{MP\ 2,5} = FE_{MPS} * 0{,}03 \quad \text{(EC. 17)}$$

Los factores de emisión obtenidos son los siguientes:

Tabla 35. Factores de emisión por tronadura

fe (Kg/N° tronadura)		
MP10	MP2,5	MPS
40,4465	2,3335	77,78

Fuente: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.11.9 Western surface coal mining" (EPA, 1998a).

2.5.7.2 Nivel de actividad

El nivel de actividad corresponde al número de eventos de tronadura realizados durante un año. De acuerdo con los antecedentes del Proyecto, se considera la realización de 240 tronaduras anuales

Tabla 36. Nivel de actividad tronaduras por año

Actividades	N° de tronaduras por año	superficie de cada tronadura (m^2)
Perforaciones Rajo Año 1 al 3	240	5000

Fuente: Elaboración propia.

2.5.7.3 Emisiones por año

Por lo tanto, considerando los factores de emisión y niveles de actividad correspondiente, las emisiones generadas por tronaduras en la fase de operación del Proyecto se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 37. Emisiones por tronadura fase operación años del 1 al 3

Actividades	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
Perforaciones Año 1 al 3 Rajo	9,70716	0,56003	18,66762
Total anual años 1 al 3 Rajo	**9,70716**	**0,56003**	**18,66762**

Fuente: Elaboración propia.

2.5.8 Resumen emisiones anuales fase de operación

A continuación, se presenta un resumen de la estimación de emisiones atmosféricas para la fase de operación del Proyecto.

Tabla 38. Emisiones totales fase operación año 1 al 3 Rajo

FASE OPERACIÓN	Emisiones (t/año)							
	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Maquinaria fuera de ruta	1,42527	1,42527	1,42527	42,86518	0,09258	0,02469	24,93306	12,45495
Tránsito de vehículos por vías no pavimentadas	121,18047	12,11805	395,85619	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Combustión de Vehículos	0,00781	0,00780	0,00781	1,34503	0,00222	0,00851	0,03613	0,00379
Perforaciones	1,83514	0,27527	6,15859	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Movimiento de tierra	4,03035	0,61031	8,52131	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Acopio de tierra	52,23472	8,00238	104,14050	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tronaduras	9,70716	0,56003	18,66762	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
TOTAL	**190,4209**	**22,9991**	**534,7774**	**44,2102**	**0,0948**	**0,0332**	**24,9692**	**12,4587**

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Emisiones totales fase operación año 1 al 5 UG

FASE OPERACIÓN	Emisiones (t/año)							
	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Maquinaria fuera de ruta	3,70948	3,70948	3,70948	34,55037	0,09246	0,02427	34,43352	3,88984
Tránsito de vehículos por vías no pavimentadas	58,55531	5,85553	191,28068	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Combustión de Vehículos	0,00697	0,00697	0,00697	1,20410	0,00198	0,00756	0,03246	0,00360
Perforaciones	5,21230	0,78184	17,49211	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Movimiento de tierra	0,72410	0,10965	1,53096	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Acopio de tierra	12,41807	1,90245	24,75795	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
TOTAL	80,6262	12,3659	238,7782	35,7545	0,0944	0,0318	34,4660	3,8934

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 40. Emisiones totales fase operación año 1 al 3 Rajo + UG

FASE OPERACIÓN	Emisiones (t/año)							
	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Maquinaria fuera de ruta	5,13475	5,13475	5,13475	77,41554	0,18504	0,04896	59,36659	16,34479
Tránsito de vehículos por vías no pavimentadas	179,73578	17,97358	587,13687	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Combustión de Vehículos	0,01478	0,01477	0,01478	2,54913	0,00421	0,01606	0,06858	0,00739
Perforaciones	7,04743	1,05711	23,65070	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Movimiento de tierra	4,75445	0,71996	10,05227	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Acopio de tierra	64,65279	9,90483	128,89853	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tronaduras	9,70716	0,56003	18,66762	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
TOTAL	271,0471	35,3650	773,5555	79,9647	0,1892	0,0650	59,4352	16,3522

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Emisiones totales fase operación año 6 al 28 UG

FASE OPERACIÓN	Emisiones (t/año)							
	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Maquinaria fuera de ruta	3,09124	3,09124	3,09124	28,79197	0,07705	0,02022	28,69460	3,24153
Tránsito de vehículos por vías no pavimentadas	56,56845	5,65685	184,79028	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Combustión de Vehículos	0,00658	0,00658	0,00658	1,13860	0,00188	0,00714	0,03101	0,00357
Perforaciones	2,79943	0,41991	9,39470	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Movimiento de tierra	0,61124	0,09256	1,29233	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Acopio de tierra	12,41807	1,90245	24,75795	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
TOTAL	75,4950	11,1696	223,3331	29,9306	0,0789	0,0274	28,7256	3,2451

Fuente: Elaboración propia.

2.6 Cálculo de emisiones de fase de cierre

2.6.1 Emisiones por combustión de maquinaria fuera de ruta

La metodología ocupada se basa en el documento "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002), que aporta con la fórmula general de obtención de emisiones, y en segundo lugar, en el capítulo "1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), que aporta con factores de emisión y parámetros actualizados.

2.6.1.1 Factores de emisión

Para determinar las emisiones generadas por la combustión de maquinaria fuera de ruta se considera la siguiente ecuación:

$$E_{i,j} = h_i * P_i * (1 + FD_i) * FC_i * TAF_i * FE_{Basei,j}$$

Dónde,

$E_{i,j}$: Emisiones del contaminante j, de la maquinaria i, en [g/año].
h_i: Horas de utilización de la maquinaria i, en [h/año].
Pi: Potencia del tipo de maquinaria i, en [kW].
FD_i: Factor de deterioro de la maquinaria i, adimensional.
FC_i: Factor de carga de la maquinaria i, adimensional.
TAF_i: Factor de ajuste transiente de la maquinaria i, adimensional.
FE_{Base}: Factor de emisión del contaminante j, de la maquinaria i, en [g/kWh]

A su vez, el Factor de Deterioro (FD), está dado por una relación entre la vida útil de la maquinaria y la edad de la maquinaria.

$$FD = \frac{k}{VU} * FD_{VU}$$

Dónde:

k: Edad de la maquinaria (entre 0 y la vida útil), en años.

VU: Vida útil de la maquinaria, en años.

FD_{VU}: Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria.

El Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria (FD_{VU}) queda dado por la siguiente tabla a continuación:

Tabla 42. Factor de deterioro relativo a la vida útil de la maquinaria

Tecnología	MP	NOx	CO	COVs
Previo a stage I	0,473	0,024	0,185	0,047
Stage I	0,473	0,024	0,101	0,036
Stage II	0,473	0,009	0,101	0,034
Stage IIIA, posteriores	0,473	0,008	0,151	0,027

Fuente: Tabla 3-11 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002).

Con respecto a la edad de la maquinaria, se considerará una antigüedad de 8 años. Por lo tanto, el Factor de deterioro para cada maquinara son los siguientes:

Tabla 43. Factor de deterioro maquinaria

Maquinaria	k	VU	FD MP	FD NOx	FD CO	FD COVs
EXCAVADORA, KOMATSU PC-450	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216
MOTONIVELADORA, CAT 160M	8	10	0,3784	0,0064	0,1208	0,0216

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

Para el Factor de carga (FC), en base a lo señalado en la "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana (Seremi del Medio Ambiente RM, 2020) y según lo señalado por Caterpillar (2017), considerando un escenario conservador, se debe utilizar un valor de 0,8 para todas las maquinarias fuera de ruta.

Para el factor de ajuste transiente (TAF), se aplicarán los valores presentados en la siguiente tabla según corresponda:

Tabla 44. Factor de ajuste transiente

TAF	MP	NOx	CO	COVs
Stage II y previos	1,23	0,95	1,53	1,05
Stage IIIA	1,470	1,040	1,530	1,050
Stage IIIB-V	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: Tabla 3-14 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" EPA, 2002.

Respecto al Factor de emisión base (FEbase), según señalado en la "Guía Para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana" (Seremi del Medio Ambiente RM, 2020) y de acuerdo con lo señalado en y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road

Engine Emissions Modeling" (EPA, 2002) y en "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), se considerarán lo siguientes factores, teniendo en cuenta la potencia de la maquinaria:

Tabla 45. Factor de emisión base operación de maquinaria

Maquinaria	FEb MP	FEb NOx	FEb SO_2	FEb NH_3	FEb CO	FEb COVs
EXCAVADORA, KOMATSU PC-450	0,1	3,24	0,0075	0,002	1,5	0,3
MOTONIVELADORA, CAT 160M	0,1	3,24	0,0075	0,002	1,5	0,3

Fuente: Tabla 3-6 "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery" (EMEP/EEA, 2019), Guía para la estimación de emisiones atmosféricas en la RM (Seremi del Medio Ambiente, 2020) y "Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values For Non Road Engine Emissions Modeling" EPA, 2002.

2.6.1.2 Nivel de actividad fase cierre

El nivel de actividad corresponde a las horas de utilización de cada maquinaria usada en el Proyecto durante la fase de operación:

Tabla 46. Nivel de actividad operación maquinaria fuera de ruta fase de cierre

Maquinaria	Potencia (kW)	Cantidad	Horas de funcionamiento fase operación (h/fase)
EXCAVADORA, KOMATSU PC-450	263	1	810
MOTONIVELADORA, CAT 160M	159	1	240

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002).

2.6.1.3 Emisiones por año fase cierre

Considerando los parámetros del factor de emisión y el nivel de actividad de cada maquinaria para la fase de operación del Proyecto, se estima que se generarán las siguientes cantidades de contaminantes debido a la operación de maquinaria fuera de ruta:

Tabla 47. Emisiones maquinaria fase de cierre (t/año)

Maquinaria	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
EXCAVADORA, KOMATSU PC-450	0,0235	0,0235	0,0235	0,5557	0,0013	0,0003	0,2865	0,0522
MOTONIVELADORA, CAT 160M	0,0062	0,0062	0,0062	0,1035	0,0002	0,0001	0,0785	0,0098
TOTAL Fase de cierre	**0,0297**	**0,0297**	**0,0297**	**0,6592**	**0,0015**	**0,0004**	**0,3650**	**0,0621**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2002), EMEP/EEA (2019) y Seremi del Medio Ambiente RM (2020).

2.6.2 Emisiones por combustión de vehículos

Para la estimación de las emisiones atmosféricas producto de la combustión interna de vehículos, se utilizarán los factores de emisión presentados en EMEP/EEA, 2019, en particular, los señalados en la sección 3.3 "Tier 2 Method". Estos factores dependen de la categoría vehicular, del tipo de combustible, cilindrada, peso, y de la normativa de emisiones. Mientras que los cálculos se han dividido en 3; Año del 1 al 3 para extracción en el Rajo, extracción año del 1 al 5 extracción subterránea (UG) y del 6 al 28 Ampliación Mina Subterránea Las Marías (UG).

2.6.2.1 Factores de emisión

Para el cálculo de las emisiones generadas a partir de los motores de los vehículos de transporte que se ocuparán durante la fase de operación del Proyecto, se consideran los siguientes factores de emisión de acuerdo con el tipo de vehículo:

Tabla 48. Factores de emisión combustión motores de vehículos (g/km)

Vehículo	MP10	MP2,5	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Vehículos livianos Diesel <3,5 [t] Euro VI	0,0009	0,0009	0,49	0,0024	0,0019	0,075	0,035
Vehículos pesados diesel<7,5 Euro VI	0,0008	0,0008	0,291	0,0047	0,011	0,071	0,008
Vehículos pesados Diesel Diésel >32 [t] Euro IV	0,03	0,03	4,61	0,01	0,03	0,12	0,01

Fuente: "Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.3.b Road Transport (EMEP/EEA, 2019).

2.6.2.2 Nivel de actividad

El nivel de actividad de las emisiones por la combustión de los motores de vehículos viene dado por la cantidad de kilómetros que estos recorren durante la fase de cierre, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 49. Distancia recorrida vehículos (Km)

Tipo de Vehículo	Viajes ida y vuelta (anual)	Distancia recorrida por viaje (Km)	Distancia total recorrida (Km)	Rutas
Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	60	35,70	2142	Traslado agua
Camioneta O&M, Mitsubishi L200	90	20,00	1800	Traslado personal

Fuente: Elaboración propia en base a EMEP/EEA, 2019.

2.6.2.3 Emisiones por año fase de cierre

Las emisiones totales producto de la combustión de los motores de los vehículos que se utilizarán en la fase de operación del Proyecto resultan de:

Tabla 50. Emisiones por combustión de motores de vehículos fase cierre (t/año)

Tipo vehículo		Emisiones (t/año)						
	MP10	MP2,5	MPS	NOx	SO2	NH_3	CO	COVs
Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	0,00006	0,00006	0,00006	0,00987	0,00002	0,00006	0,00026	0,00003
Camioneta O&M, Mitsubishi L200	0,000002	0,000002	0,000002	0,00088	0,000004	0,000003	0,00014	0,00006
TOTAL	**0,00006**	**0,00006**	**0,00006**	**0,01076**	**0,00002**	**0,00007**	**0,00039**	**0,00009**

Fuente: Elaboración propia 2025.

2.6.3 Emisiones por tránsito de vehículos por vías no pavimentadas

Cuando un vehículo transita por un camino no pavimentado, la fuerza de las ruedas produce pulverización de las partículas superficiales, las cuales son levantadas por el movimiento rotatorio de las ruedas en combinación con la turbulencia generada por el paso del vehículo. Para determinar las emisiones generadas por el Proyecto en la fase de operación se utilizará la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.2 Unpaved Roads" (EPA, 2006a).

2.6.3.1 Factores de emisión

Se establece el siguiente factor de emisión para la circulación de vehículos por caminos no pavimentados industriales dominados por vehículos pesados:

$$fe = k * 281{,}9 * \left(\frac{s}{12}\right)^{0{,}9} \left(\frac{W}{2{,}72}\right)^{0{,}45} \left(\frac{g}{Km}\right) (Ec.5)$$

Dónde,

k: 1,5 (g/Km) para MP10, 0,15 (g/Km) para MP2,5 y 4,9 para MPS.
s: contenido de material fino en la superficie [%]. Valor por defecto: 8,5.
W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t].

El peso promedio de la flota, para un determinado camino no pavimentado y año cronológico, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{\sum_i^n [P_i N v_i]}{\sum_j^n N v_j} (Ec. 6)$$

Dónde,

W: peso promedio de la flota que transita por las vías [t].
$\underline{P_i}$: Promedio entre el peso con y sin carga (en [t]), del vehículo que hace un determinado tipo de viaje i. Por ejemplo, un tipo de viaje puede ser el traslado de escombros en el año 1 del proyecto.
Nv_i: Número de viajes del tipo de viaje i, en el año cronológico en cuestión.
Nv_j: Número de viajes del tipo de viaje j, en el año cronológico en cuestión.
n: Cantidad de tipos de viajes en el año cronológico en cuestión.

Considerando todos los vehículos que transitarán por el camino no pavimentado, se determinó un peso promedio (W). Los parámetros obtenidos y los factores de emisión se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 51. Parámetros y factores de emisión para caminos no pavimentados

		k			Factores de emisión (g/Km)		
Año	W	MP10	MP2.5	MPS	MP10	MP2.5	MPS
fase de cierre	27	1,5	0,15	4,9	876	88	2860

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2006a).

El parámetro W fue calculado con los siguientes a partir de los siguientes valores de los pesos de cada vehículo.

Tabla 52. Pesos vehículos

Vehículo	Peso bruto (t)	Peso con carga (t)	Peso promedio Pi (t)	Nv_i	Nv_{ij}	Nvi*Pi
Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	50,00	80,00	65,00	30,00	30	1950
Camioneta O&M, Mitsubishi L200	1,90	2,50	2,20	45,00	45	99
TOTAL					75	2049

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2006a).

2.6.3.2 Nivel de actividad

Los niveles de actividad para cada vehículo en la fase de cierre se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 53. Nivel de actividad tránsito de vehículos por vías no pavimentadas fase cierre

Tipo de Vehículo	NO Pavimentado trayecto [km]	Total Viajes (ida y vuelta) anual	Distancia total NO pavimentada recorrida (Km)	Ruta
Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	35,70	60,00	2142,00	Traslado agua
Camioneta O&M, Mitsubishi L200	20,00	90,00	1800,00	Traslado personal

Fuente: Elaboración propia en base a EPA (2011).

Humectación:

Basándose en la metodología descrita en el documento "Fugitive Dust Background Document and Technical Information Document for Best Available Control Measures" (EPA, 1992), la ecuación empleada para determinar la eficiencia de control de la humectación en caminos no pavimentados se presenta a continuación:

$$C = 100 - \frac{0{,}8 * p * d * t}{i} \ (\%)$$

Dónde:

C : Porcentaje de efectividad de la humectación (%)

p : Evaporación potencial promedio (mm/h).

d : Flujo horario en caminos sin pavimentar (veh/h).

t : Tiempo entre aplicaciones.

i : Tasa de aplicación riego (L/m^2)

De igual manera que para la fase de operación, la tasa de aplicación del riego, para a fase de cierre, considerando que el camión aljibe cuenta con una capacidad de 20.000 litros, para alcanzar una eficiencia del 75% en la supresión del polvo, es necesario implementar la estrategia de humectación cada máximo 7,4 horas, aplicando la humectación mínimo 2 veces al día en la jornada de trabajo, abarcando así todas las superficies de los caminos no pavimentados que serán utilizadas durante la jornada laboral diaria.

2.6.3.3 Emisiones por año fase de cierre

Considerando los factores de emisión, nivel de actividad y factor de corrección anteriormente descrito, se detalla a continuación las emisiones producto del tránsito de vehículos por vías no pavimentadas.

Tabla 54. Emisiones por tránsito en Vías no pavimentadas fase de cierre

Vehículo	MP10 (t/año)	MP2.5 (t/año)	MPS (t/año)
Camión Aljibe, MBENZ ACTROS	0,4688	0,0469	1,5315
Camioneta O&M, Mitsubishi L200	0,3940	0,0394	1,2870
TOTAL	**0,8628**	**0,0863**	**2,8185**

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006a.

2.6.4 Emisiones por movimiento de tierra

Corresponden a las emisiones producidas al momento de cargar o descargar el material excavado, escombros, etc. Para calcular estas emisiones se procederá según la metodología descrita en "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles" (EPA, 2006b).

2.6.4.1 Factores de emisión

Los factores de emisión definidos por la EPA son los siguientes:

$$fe_{MP10} = \frac{0{,}35 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.8)$$

$$fe_{MP2{,}5} = \frac{0{,}053 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.9)$$

$$fe_{MPS} = \frac{0{,}74 * 0{,}0016 * \left(\frac{U}{2{,}2}\right)^{1{,}3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1{,}4}} \left(\frac{Kg}{t}\right) (Ec.10)$$

Dónde,

U: velocidad del viento promedio.

M: Porcentaje de humedad del suelo, Valor por defecto: 6,5.

Por lo tanto, los factores de emisión resultantes son los siguientes.

Tabla 55. Factores de emisión por transferencia de material

fe (Kg/t)		
MP10	MP2,5	MPS
0,00031	0,00005	0,00066

Fuente: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles" EPA, 2006b.

2.6.4.2 Nivel de actividad

Para contemplar todas las emisiones, el nivel de actividad es equivalente a las toneladas del material cargado más el descargado, es decir, es igual a las toneladas del material trasladado, multiplicadas por dos.

Tabla 56. Nivel de actividad carga y descarga material

Actividades	Volumen material (m^3)	Densidad (t/m^3)	Material total cargado y descargado (t)
Construcción Pretil	71.802	1,6	114.883

Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.6.4.3 Emisiones fase cierre

Por lo tanto, considerando los factores de emisión y niveles de actividad correspondiente, las emisiones generadas por la carga y descarga de material se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 57. Emisiones por transferencia de material fase de cierre

Actividades Movimiento de tierra	Emisiones (t/año)		
	MP10	MP2,5	MPS
Construcción Pretil	0,07184	0,01088	0,15188

Fuente: Elaboración propia en base a EPA, 2006b.

2.6.5 Resumen emisiones anuales fase de cierre

A continuación, se presenta un resumen de la estimación de emisiones atmosféricas para la fase de cierre del Proyecto.

Tabla 58. Emisiones totales fase cierre

FASE CIERRE	Emisiones (t/año)							
	MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Maquinaria fuera de ruta	0,07184	0,01088	0,15188	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Tránsito de vehículos por vías no pavimentadas	0,00006	0,00006	0,00006	0,01076	0,00002	0,00007	0,00039	0,00009
Combustión de Vehículos	0,02968	0,02968	0,02968	0,65923	0,00151	0,00040	0,36504	0,06206
Movimiento de tierra	0,86281	0,08628	2,81853	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
TOTAL	**0,9644**	**0,1269**	**3,0001**	**0,6700**	**0,0015**	**0,0005**	**0,3654**	**0,0621**

Fuente: Elaboración propia.

3 Resumen emisiones por año cronológico

A continuación, se presenta una tabla resumen con el total de emisiones atmosféricas (t/año) estimadas para cada año cronológico según el cronograma general del Proyecto.

Tabla 59. Emisiones por año cronológico

AÑOS	Fase	Emisiones (t/año)							
		MP10	MP2.5	MPS	NOx	SOx	NH_3	CO	COVs
Año 1-3	Operación rajo+ UG	271,0471	35,3650	773,5555	79,9647	0,1892	0,0650	59,4352	16,3522
Año 4- 5	Operación UG I	80,6262	12,3659	238,7782	35,7545	0,0944	0,0318	34,4660	3,8934
Año 6-28	Operación UG II	75,4950	11,1696	223,3331	29,9306	0,0789	0,0274	28,7256	3,2451
Año 29	Cierre	0,9644	0,1269	3,0001	0,6700	0,0015	0,0005	0,3654	0,0621

Fuente: Elaboración propia, 2026.

4 Conclusiones Estimación de emisiones atmosféricas

De acuerdo con los resultados obtenidos en la estimación de emisiones de material particulado y gases de combustión, se pueden extraer las siguientes conclusiones; en primer lugar, las emisiones calculadas corresponden a un escenario extremo, mayormente atribuible a la circulación de vehículos en vías no pavimentadas. Para llevar a cabo estas estimaciones, se han utilizado valores conservadores en los parámetros clave de las fórmulas, con el fin de representar el peor escenario posible en términos de emisiones totales del Proyecto. De este modo, las cifras obtenidas deberían considerarse como un límite máximo, y es probable que las emisiones reales sean inferiores a las proyectadas.

Al analizar las emisiones a lo largo del proyecto, se ha determinado que el periodo de operación del año 1 al 3 será el que aporte la mayor cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera. Esto se debe a la explotación conjunta tanto de la mina subterránea como del Rajo, mientras que después de los primeros 3 años, sólo se realizará la explotación subterránea, disminuyendo significativamente los niveles de emisión.

En lo que respecta a los gases de combustión, los mayores contribuyentes son los óxidos de nitrógeno (NOX) y el monóxido de carbono (CO). Estos gases se generan principalmente a partir de la combustión de vehículos y maquinarias necesarios para las labores en la faena.

Para una comprensión más detallada de los resultados de los niveles específicos de emisiones a los que estarán expuestos los receptores, y cumplimiento normativo, se debe revisar el anexo de la modelación. Este Anexo proporciona un análisis exhaustivo y específico que permitirá evaluar con mayor precisión el impacto ambiental del proyecto.

5 Bibliografía

- Campos, G. y Espinosa. E. (2014). *Análisis comparativo de la eficiencia de supresores de polvo mediante el uso del equipo Dusmate y el efecto económico para la conservación rutinaria y periódica de carpetas granulares*. Dirección de Vialidad Región del Maule, Dirección de Vialidad Región del Maule.

- Cámara Chilena de la Construcción CCHC (s.f.). *Manual de la construcción limpia*, Tema N° 2 Control de polvo en obras en construcción.

- Caterpillar. (2017). *Caterpillar Performance Handbook.*

- Confederación Suiza. (1993). *Ordenanza de la Confederación Suiza, Sobre Control de Contaminación del Aire.*

- COPEC. (2021). *Especificaciones Diésel.* Recuperado el 1 de abril de 2021, desde: https://ww2.copec.cl/combustibles/products/diésel-ultra.

- Decreto N°12/2010, Establece Norma de calidad del aire para MP2,5, Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile, 4 de junio de 2022, Santiago, Chile.

- Decreto N°12/2022, Establece Norma de calidad del aire para MP10, Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile, 9 de mayo de 2011, Santiago, Chile.

- Decreto N°15/2013, Ministerio de Medio Ambiente, Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para el Valle Central de la Región del Libertador Bernardo O´Higgins. Diario Oficial de la República de Chile, 5 de agosto de 2013, Santiago, Chile.

- Decreto N°22/2010, Establece norma de calidad secundaria de aire para anhídrido sulfuroso (SO2), Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial de la República de Chile, 16 de abril de 2010, Santiago, Chile.

- Decreto N°31/2017 Establece Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana de Santiago Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile, 24 de noviembre de 2017, Santiago, Chile.

- Decreto N°59/1998, Establece Norma de calidad del aire para MP10, Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile, 25 de marzo de 1998, Santiago, Chile.

- Decreto N°104/2018, Establece Norma de calidad del aire para SO2, Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile, 16 de mayo de 2019, Santiago, Chile.

- Decreto N°114/2002, Establece Norma de calidad del aire para NO2, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial de la República de Chile, 6 de marzo de 2003, Santiago, Chile.

- Decreto N°115/2002, Establece Norma de calidad del aire para CO, Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial de la República de Chile, 10 de septiembre de 2002, Santiago, Chile.
- Decreto N°4 Exento/2002, Establece normas de calidad del aire para material particulado sedimentable en la cuenca del Río Huasco III región, Ministerio de Agricultura. Diario Oficial de la República de Chile, 26 de mayo de 1992, Santiago, Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2026). Servicios Climáticos.
- EMEP/EEA. (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, Ch. 1.A.4 Non Road Mobile Machinery.*
- ENAP. (2022). *Petróleo Diésel Grado A1.*
- EPA. (s.f.). *AP-42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources.*
- EPA. (1996). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch. 3.3 Gasoline and Diésel Industrial Engines.*
- EPA. (1998a). *"Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.11.9 Western surface coal mining".*
- EPA. (1998b). *Screening procedures for estimating the air quality impact of stationary sources,*
- EPA. (2000). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.3 Stationary Internal Combustion Sources.*
- EPA. (2002). *Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling.*
- EPA. (2006a). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.2 Unpaved Roads.*
- EPA. (2006b). *Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP 42, 5th Edition, Ch.13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles.*
- EPA. (2011). *Compilation of air emission factor, AP-42": Chapter 13, Section 13.2.1 "Paved Road".*
- Explorador Eólico. (2021).
- Figueruelo, J. y Marino, M. (2004). *Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales*
- Lakes Environmental. (2003). *CALPUFF View User guide.*

- MMA. (2017). *Manual para el Desarrollo de Inventarios de Emisiones Atmosféricas.*
- INN Chile. (2000). *NCh 353.Of2000 "Construcción - Cubicación de obras de edificación – Requisitos.*
- Seremi del Medio Ambiente RM. (2019). *Guía para la Estimación de Emisiones Atmosféricas en la Región Metropolitana.*
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2012). *Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEA.*