

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“INVENTARIO DE EMISIONES Y MODELAMIENTO  
DE DISPERSIÓN PARA UN PROYECTO MINERO A TAJO ABIERTO”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título de:

**INGENIERA METEORÓLOGA**

**MARÍA FERNANDA DE LOS RÍOS OLÓRTEGUI**

Lima – Perú

**2023**

---

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación  
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

## Document Information

Analyzed document	TSP - María Fernanda De los Ríos.docx (D156749648)
Submitted	1/23/2023 9:54:00 PM
Submitted by	Ernesto Menacho Cassimiro
Submitter email	emenacho@lamolina.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	emenacho.unalm@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>TFM MINERA JICAMARCA E.docx</b> Document TFM MINERA JICAMARCA E.docx (D110963604)	 1
<b>SA</b>	<b>UNU_AMBIENTAL_2022_T_ABEL-SANCHEZ_DEIVY-ALDABA_V1.pdf</b> Document UNU_AMBIENTAL_2022_T_ABEL-SANCHEZ_DEIVY-ALDABA_V1.pdf (D139104549)	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/technic3.pdf">https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/technic3.pdf</a> Fetched: 5/2/2020 2:45:48 PM	 1
<b>SA</b>	<b>1561525339_496__IMPACTOS_SOBRE_LA_ATMÓSFERA__DISEÑO_DE_UNA_PRESA_PARA_EMBALSAR_AGUAS_LLUVIAS.pdf</b> Document 1561525339_496__IMPACTOS_SOBRE_LA_ATMÓSFERA__DISEÑO_DE_UNA_PRESA_PARA_EMBALSAR_AGUAS_LLUVIAS.pdf (D54522730)	 2
<b>W</b>	URL: <a href="https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6794/GUTIERREZ_DARIO_IMPAC...">https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6794/GUTIERREZ_DARIO_IMPAC...</a> Fetched: 1/19/2022 10:45:01 PM	 1
<b>SA</b>	<b>PRO-2-BARRAGAN_OSCAR-CASTRO_NICOLAS.docx</b> Document PRO-2-BARRAGAN_OSCAR-CASTRO_NICOLAS.docx (D77883852)	 1
<b>SA</b>	<b>16_12_2020_PROY INVEST TESIS - Meryann Llerena.pdf</b> Document 16_12_2020_PROY INVEST TESIS - Meryann Llerena.pdf (D90564721)	 1
<b>SA</b>	<b>ASTOCONDOR_AAF.pdf</b> Document ASTOCONDOR_AAF.pdf (D117495836)	 1
<b>SA</b>	<b>IDENTIFICACION DE ASPECTOS AMBIENTALES Y SUS CONTROLES OPERATIVOS EN LOS PROCESOS DE PERFORACION Y VOLADURA – COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCAY S.A. – ESPINAR, CUSCO.pdf</b> Document IDENTIFICACION DE ASPECTOS AMBIENTALES Y SUS CONTROLES OPERATIVOS EN LOS PROCESOS DE PERFORACION Y VOLADURA – COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCAY S.A. – ESPINAR, CUSCO.pdf (D58812375)	 1
<b>SA</b>	<b>1617288489_Trabajo de Titulación_E Garcia_C Panchana.pdf</b> Document 1617288489_Trabajo de Titulación_E Garcia_C Panchana.pdf (D100440008)	 4

## Entire Document

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS  
 Descripción del modelo y supuestos Descripción de datos de entrada  
 Descripción de la configuración del modelo Descripción de resultados del modelamiento  
 Identificación de fuentes de emisión Descripción de factores de emisión Descripción de tasas de emisión  
 Modelamiento de dispersión atmosférica Fuentes y tasas de emisión Datos meteorológicos Datos de terreno

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA  
LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“INVENTARIO DE EMISIONES Y MODELAMIENTO  
DE DISPERSIÓN PARA UN PROYECTO MINERO A TAJO ABIERTO”**

Trabajo de Suficiencia Profesional para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERA METEORÓLOGA**

Presentada por:

**MARÍA FERNANDA DE LOS RÍOS OLÓRTEGUI**

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

---

Mg.sc. Jerónimo García Villanueva  
Presidente

---

Mg. Sc. Ely Oliver Guardia Jara  
Miembro

---

Ing. Franklin Delio Unsihuay Tovar  
Miembro

---

Dr. Ernesto Ever Menacho Casimiro  
Asesor

## **DEDICATORIA**

*A Wicked*

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	iv
ABSTRACT .....	v
I. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Problemática .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
II. MARCO DE REFERENCIA .....	3
2.1. Minería a tajo abierto .....	3
2.2. Análisis de impactos a la calidad ambiental del aire .....	9
2.3. Inventarios de emisiones .....	10
2.4. Modelos de dispersión.....	11
2.5. AERMOD.....	11
III. DESARROLLO DEL TRABAJO .....	13
3.1. Inventario de emisiones.....	13
3.1.1. Fuentes de emisión.....	14
3.1.2. Factores y tasas de emisión .....	17
3.2. Modelamiento de dispersión.....	27
3.2.1. Modelo de dispersión AERMOD .....	28
3.2.2. Datos de entrada del modelo de dispersión .....	29
3.2.3. Configuración del modelo .....	30
3.2.4. Resultados del modelo .....	32
IV. CONCLUSIONES .....	34
V. RECOMENDACIONES .....	35
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Estándares de Calidad Ambiental para Aire.....	9
--	---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto .....	1
Figura 2. Principales componentes de una mina a tajo abierto .....	7
Figura 3. Diagrama de datos de entrada de un modelo de dispersión atmosférica.....	13
Figura 4. Flujograma de la metodología considerada para la descripción del inventario de emisiones .....	14
Figura 5. Flujograma de la metodología considerada para la descripción del modelamiento de dispersión .....	28

## RESUMEN

En el presente documento se describe la metodología para la elaboración de un inventario de emisiones y las características del modelamiento de dispersión respectivo para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto, como parte de su proceso de certificación ambiental. Se describió la metodología para estimar las emisiones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y CO mediante el uso de factores de emisión para el escenario de máximas emisiones de las etapas de construcción y operación del proyecto. Con base en las tasas de actividad y los factores de emisión específicos para cada una de las fuentes, se calculan las tasas de emisión y se completa el inventario de emisiones, el cual sirve para alimentar el modelamiento de dispersión. Se consideró el modelo de dispersión AERMOD puesto que es uno de los recomendados para fines de permisos ambientales. Este modelo requiere de las características de las fuentes de emisión, con su respectiva tasa de emisión; datos meteorológicos de al menos tres años; y, datos de terreno en formato DEM. Se debe crear un archivo de entrada (.adi) para cada uno de los parámetros a ser evaluados, debido a que se consideran emisiones específicas para cada caso. Luego, se procede a correr, dando como resultado un archivo de salida (.ado), donde se encuentran los resultados para cada uno de los receptores considerados (ya sean grilla o receptores sensibles); y, archivos gráficos (.plt). Con estos archivos, se puede analizar el momento y ubicación en la que se da las mayores concentraciones resultantes para cada parámetro; mientras que, los archivos gráficos, permiten graficar isóneas de concentraciones máximas.

**Palabras clave:** Certificación ambiental, proyecto minero, tajo abierto, inventario de emisiones, modelamiento de dispersión de aire, AERMOD

## ABSTRACT

In the following document is described the methodology for an emissions inventory and the characteristics of an air dispersion modeling for a greenfield open pit mining project, as part of its environmental certification process. The methodology for estimating PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> and CO emissions was described by using emission factors for the scenario of maximum emissions of the construction and operation stages of the project. Based on the activity rates and the specific emission factors for each source, the emission rates are calculated, and the emissions inventory is completed, which serves to feed the dispersion modeling. The AERMOD dispersion model was considered since it is recommended for environmental permit purposes. This model requires the characteristics of the emission sources, with their respective emission rate; meteorological data for at least three years; and terrain data in DEM format. An input file (.adi) must be created for each of the parameters to be evaluated, since specific emissions are considered for each case. Then the model is run, resulting in an output file (.ado), where the results are found for each of the receptors considered (whether they are grid or sensitive receptors); and graphic files (.plt). Based on these files, the time and location in which the highest resulting concentrations for each parameter occur can be analyzed; while the graphic files allow plotting isolines of maximum concentrations.

**Keywords:** Environmental certification, mining project, open pit, emissions inventory, air dispersion modeling, AERMOD

# I. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Problemática

La minería es un sector económico que ha tenido un impacto importante en el Perú de los últimos años (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería [OSINERGMIN], 2017). Las exportaciones mineras han significado más del 77 % del valor total de las exportaciones, en promedio, para el periodo 2002-2015. Asimismo, las inversiones mineras para el periodo mencionado crecieron en casi doce veces; y se espera que estas sigan en aumento en el periodo 2022-2025 (Rumbo Minero, 2022).

Cada uno de los proyectos mineros, como cualquier otro proyecto de inversión, tiene que pasar por un proceso de certificación ambiental para poder proceder con sus actividades, ya sea, de exploración o de explotación. Es así como, mediante la aprobación de un instrumento de gestión ambiental (IGA), se asegura que el proyecto cumple con los requisitos del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA], 2016).

Los estudios de impacto ambiental, semidetallados o detallados, son los IGA preventivos para proyectos que pueden producir impactos ambientales negativos moderados o significativos. Estos deben identificar y caracterizar las implicancias e impactos que las matrices ambientales pueden tener durante la duración del proyecto. La calidad ambiental del aire es una de las matrices en las que existen impactos ambientales en los proyectos mineros (Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2015).

Dependiendo de la complejidad del proyecto y los requerimientos de los términos de referencia del IGA en cuestión; los modelamientos de dispersión son herramientas que permiten caracterizar los impactos ambientales del proyecto a la calidad ambiental del aire. Asimismo, esta herramienta permite la evaluación de la implementación de medidas de control adicionales y la recomendación de una red de monitoreo de calidad (United States of America Environmental Protection Agency [US EPA], s.f.-a). El modelamiento requiere de

información específica, tanto del proyecto como del sitio donde se ubica, para poder Desarrollarse: descripción detallada del proyecto y sus procesos, para poder identificar las fuentes de emisiones y sus características; topografía del lugar, para poder generar la altitud de cada una de las fuentes de emisiones y receptores; y registros meteorológicos de la zona, para poder describir las condiciones del tiempo del lugar con base en las principales variables meteorológicas.

Es por esta razón que, considerando la necesidad de los proyectos mineros por obtener la certificación ambiental respectiva, se encuentra relevante describir la metodología usada para la elaboración de un inventario de emisiones y las características del modelamiento de dispersión con el fin de permitir caracterizar los impactos a la calidad ambiental del aire con los resultados obtenidos de este último.

## **1.2. Objetivos**

### 1.2.1. Objetivo general

Describir, bajo la experiencia profesional adquirida, la metodología para la elaboración del inventario de emisiones y el modelamiento de dispersión para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Describir la elaboración del inventario de emisiones para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto.
- Describir las características y configuración del modelamiento de dispersión para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto.

## **II. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1. Minería a tajo abierto**

La minería es la actividad que involucra la explotación de yacimientos para la extracción de minerales metálicos o no metálicos. Esta actividad extractiva tiene cuatro etapas principales (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía [SNMPE], s.f.-a):

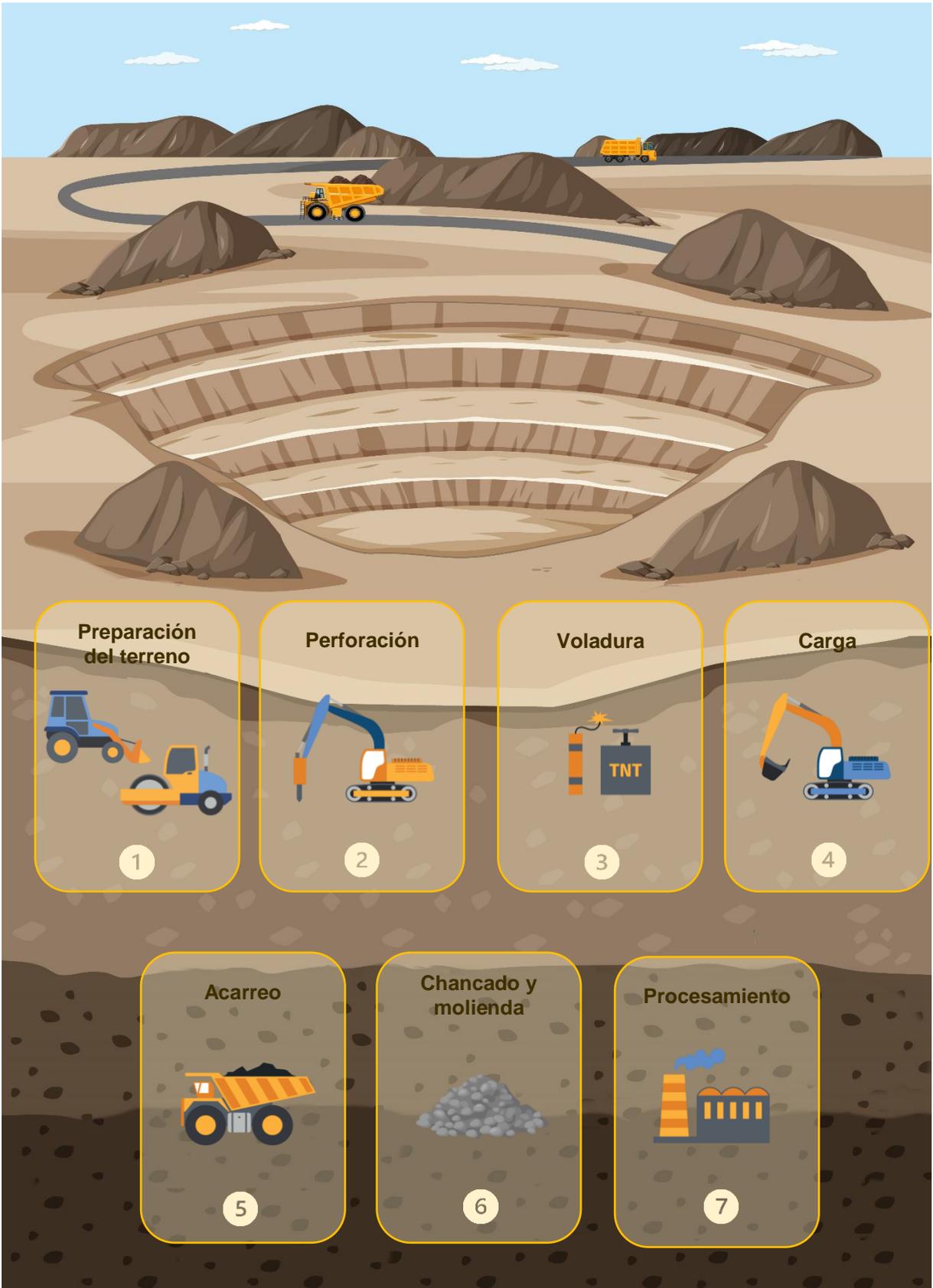
- Exploración, que es la búsqueda, identificación y medición de zonas mineralizadas.
- Construcción, que es la ejecución de obras de infraestructura para el proyecto como la mina (túneles o tajo), el campamento, la planta concentradora y las vías de accesos.
- Producción, que es la extracción, procesamiento, transporte y comercialización del mineral.
- Cierre, que es el cese de las operaciones, incluyendo el desmantelamiento de instalaciones y equipos; así como, la rehabilitación de la zona utilizada.

El método de extracción del recurso mineral depende de su ubicación (en la superficie o bajo tierra), su tamaño y forma, y si es muy duro o relativamente blando (Mineral Resources Education Program of BC, 2022; SNMPE, s.f.-b). En general, se pueden dividir en minería superficial y subterránea.

La minería a tajo abierto, también conocida como minería a cielo abierto, es una técnica de minería superficial que utiliza bancos horizontales para extraer el mineral que se encuentra en o cerca de la superficie de la Tierra, mientras se elimina el desmonte en sitios de disposición fuera del tajo. La minería a tajo abierto es el método más común utilizado en todo el mundo para la extracción de minerales y no requiere de métodos de extracción subterráneos ni túneles (Altiti et. al, 2021). El ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto se resume en siete actividades (Altiti et. al, 2021; Mineral Resources Education Program of BC, 2022; SNMPE, s.f.-b):

- Preparación del terreno, que consiste en la excavación de material y su traslado a distancias cortas; así como, la creación de superficies planas. Estas actividades son realizadas generalmente por retroexcavadoras, tractores, rodillos y motoniveladoras.
- Perforación, que consiste en la realización de barrenos (agujeros), con características específicas, donde se cargará explosivos. Esta actividad es generalmente realizada con perforadoras eléctricas.
- Voladura, que consiste en la carga de explosivos en los barrenos y su detonación, con el fin de fracturar la roca en un tamaño que pueda ser cargado y movilizado.
- Carga, que consiste en el llenado de camiones con la roca fragmentada, haciendo uso de cargadores frontales y palas.
- Acarreo, que consiste en el traslado de la roca fragmentada hacía, dependiendo de sus características, el proceso de chancado o depósitos (de mineral o desmonte); mediante camiones mineros.
- Chancado y molienda, que consiste en el triturado de la roca fragmentada hasta obtener el tamaño necesario para que pueda ser procesado. Esta actividad se realiza generalmente con chancadoras primarias y secundarias.
- Procesamiento, que consiste en una serie de procedimientos por los que pasa la roca fragmentada para convertirse en concentrado. Como residuo del procesamiento se obtiene relaves, los cuales se acumulan en un depósito.

En la Figura 1 se esquematiza el ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto.



**Figura 1.** Ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto

Tomando en cuenta el ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto, los principales componentes que se identifican son los siguientes (Ministerio de Minas y Energía, 2003):

- Tajo, donde se extrae el mineral y desmante.
- Depósito de desmante, donde se acumula los residuos extraídos del tajo.
- Depósito de relaves, donde se acumulan los residuos del procesamiento del mineral.
- Pilas de almacenamiento, donde se puede apilar roca fragmentada, mineral, concentrado u otros.
- Chancadora primaria, donde se tritura la roca fragmentada extraída del tajo.
- Planta de procesamiento, donde se ingresa el mineral chancado para procesarse hasta concentrado.
- Vías de acceso, por las cuales se realiza el transporte de roca fragmentada o mineral entre los diferentes componentes.
- Campamento e instalaciones administrativas, donde se encuentran asentados los colaboradores involucrados en las operaciones de la mina.

En la Figura 2 se muestra los principales componentes en una mina a tajo abierto.



**Figura 2.** Principales componentes de una mina a tajo abierto

Las actividades realizadas en el ciclo de operaciones de una mina a tajo abierto pueden generar emisiones de material particulado y/o gases. Considerando un proyecto *greenfield*, el cual se realizará en un área no disturbada, donde no existen construcciones previas a las que se planifiquen realizar, las principales emisiones se asocian a las siguientes actividades (Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros [DGAAM], 2007; Ministerio de Minas y Energía, 2003):

- Remoción de suelo superficial, que se trata del desbroce de la zona, como parte de las actividades de preparación del terreno.
- Demolición, que se trata del derribo y excavación del terreno para el reacomodo del suelo en un área en específico, como parte de las actividades de preparación del terreno o la operación de un componente.
- Nivelación, que se trata de las actividades asociadas a la creación de superficies planas en un área en específico, como parte de las actividades de preparación del terreno o la operación de un componente.
- Perforación, que se trata de la realización de barrenos para la carga de explosivos.
- Voladura, que se trata de la detonación de los explosivos cargado en los barrenos.
- Tránsito de camiones de acarreo, que se trata del traslado de diferentes materiales (roca fragmentada, mineral, desmonte, concentrado) entre los componentes de la mina.
- Erosión eólica en pilas de almacenamiento, que se trata de pérdida del material suelto apilado causado por el viento.
- Transferencia y carga de materiales, que se tratan de las actividades de manipuleo de diferentes materiales, especialmente para su carga en camiones mineros para su traslado.
- Chancado primario, secundario y terciario, que se tratan de diferentes procesos de trituración del mineral hasta el tamaño adecuado para que pueda pasar por el procesamiento para convertirse en concentrado.
- Combustión en equipos y camiones, que se tratan de las emisiones generadas por la combustión de los motores de los equipos y camiones usados en los diferentes componentes de la mina.

## 2.2. Análisis de impactos a la calidad ambiental del aire

La Ley General del Ambiente (Ley N° 28611) define que los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) son de consideración obligatoria en todos los instrumentos de gestión ambiental. Es así como es necesario que se concluya, bajo un análisis de impactos, que la implementación de la actividad planteada dentro del proyecto en cuestión cumpla con los ECA. En este sentido, el análisis de impactos a la calidad ambiental del aire, como el de otras matrices, es necesario para lograr la certificación ambiental respectiva.

De esta forma, se debe considerar analizar los futuros impactos a la calidad ambiental del aire para asegurar que el proyecto en cuestión no contribuya significativamente o cause la excedencia de alguno de los ECA para Aire. Los ECA para Aire vigentes son los aprobados por el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, los cuales regulan las concentraciones máximas permitidas en receptores para diversos parámetros como material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>), material particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y monóxido de carbono (CO). En la Tabla 1 se muestran las concentraciones, periodos y criterios de evaluación para cada uno de los parámetros antes mencionados de los ECA para aire.

**Tabla 1:** Estándares de Calidad Ambiental para Aire

<b>Parámetro</b>	<b>Periodo</b>	<b>Concentración (µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Criterio de Evaluación</b>
PM <sub>10</sub>	24 horas	100	No exceder más de 7 veces al año
	Anual	50	Media aritmética anual
PM <sub>2,5</sub>	24 horas	50	No exceder más de 7 veces al año
	Anual	25	Media aritmética anual
NO <sub>2</sub>	1 hora	200	No exceder más de 24 veces al año
	Anual	100	Media aritmética anual
CO	1 hora	30 000	No exceder más de 1 vez al año
	8 horas	10 000	Media aritmética móvil
SO <sub>2</sub>	24 horas	250	No exceder más de 7 veces al año

**FUENTE:** Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM

Las herramientas para realizar el análisis de la calidad de aire deben permitir predecir las concentraciones de contaminantes del futuro proyecto. La certificación ambiental de proyectos de explotación, beneficio y labor general minero metálicos recomienda el uso de modelos matemáticos, según Resolución Ministerial N° 116-2015-MEM/DM, para la evaluación cualitativa de los potenciales impactos que se pueden generar a la calidad ambiental del aire por estudios ambientales de categoría III (MINEM, 2015).

### **2.3. Inventarios de emisiones**

Los inventarios de emisiones identifican las principales fuentes de emisión y contaminante asociado a la misma. En estos, se especifican las cantidades estimadas de contaminantes emitidos por cada fuente, en la forma de tasas de emisión. La información estimada en los inventarios de emisión sirve como input para el modelamiento de dispersión, donde se logra estimar las futuras concentraciones del proyecto y compararse con los ECA (DGAAM, 2007).

Es recomendable, para fines de permisos, la realización de inventarios de emisiones para escenarios de emisiones máximas, con el fin de obtener emisiones conservadoras. Los escenarios de emisiones máximas pueden darse cuando se asume que se trata del periodo de actividades máximas en simultáneo, operación continua de equipos, tráfico de vehículos continuo y ausencia de medidas de control de emisiones (Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2017).

Los métodos para estimar las emisiones son variados: monitoreo continuo de las emisiones de una fuente, extrapolación de mediciones de emisiones a corto plazo a un período de tiempo más largo, uso de factores de emisión, entre otros. La elección del método dependerá de la disponibilidad de datos, estado del proyecto, tiempo y financiación disponible. El uso de factores de emisión es una herramienta útil en los casos donde el proyecto aún no ha sido desarrollado (US EPA, 2022).

Un factor de emisión es un valor numérico que intenta representar la relación entre la cantidad de un contaminante emitido, con un nivel de actividad asociado con la emisión de ese contaminante. Los factores de emisión publicados en la literatura suelen ser promedios de datos disponibles y de calidad aceptable, los cuales se esperan puedan representar promedios a largo plazo para proyectos similares (US EPA, 2022).

## 2.4. Modelos de dispersión

Los modelos de calidad del aire utilizan técnicas matemáticas y numéricas para simular los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes presentes en el aire, mientras se dispersan y reaccionan en la atmósfera. Estos tienen como *input* datos meteorológicos, datos de terreno e información de fuentes (tasas de emisión), con lo que pueden caracterizar los contaminantes primarios que se emiten directamente a la atmósfera y, dependiendo del modelo, los contaminantes secundarios que se forman como resultado de reacciones químicas complejas dentro de la atmósfera (US EPA, s.f.-b). Es así como significan un vínculo entre las emisiones y su posible dispersión dada por las características del sitio.

Los modelos de dispersión se usan típicamente en el proceso regulatorio de permisos para la industria; donde es esencial estimar la concentración de contaminantes en receptores específicos a nivel del suelo que rodean una fuente de emisiones (US EPA, s.f.-c; Alberta Environment and Parks, 2021). Estas concentraciones se comparan con los ECA para Aire para asegurar que las emisiones del futuro proyecto no causen o contribuyan a la excedencia de estos.

## 2.5. AERMOD

El modelo de dispersión AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD) es el modelo principal elegido por la US EPA para la dispersión de emisiones en permisos ambientales (US EPA, 2017). Este modelo de dispersión es recomendado por diversas guías peruanas para el modelamiento en distancias de hasta 50 km (DGAAM, 2007; Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI], 2007). Se trata de una técnica basada en el concepto de plumas de dispersión para la evaluación de la concentración de contaminantes, de diversas fuentes de emisión. Este modelo incorpora métodos de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma. Las principales características y capacidades del modelo AERMOD se resumen como (US EPA, 2018):

- Representación de múltiples tipos de fuentes en simultáneo: puntuales, de área, lineales, lineal-volumen, tipo tajo y volumen.
- Consideración de emisión en diferentes alturas: superficie, cerca de la superficie y elevadas.

- Selección del tipo de área a considerarse en el modelamiento: urbana o rural.
- Selección del tipo de pluma: continua o flotante.
- Selección del tipo de deposición: deposición en seco o en húmedo, de partículas o gases.
- Tratamiento de la pluma de dispersión: tratamiento gaussiano en horizontal y en vertical para ambientes estables; y tratamiento no gaussiano en vertical para ambientes inestables.
- Selección del tipo de terreno: terreno simple o complejo.
- Inclusión de perfiles de datos meteorológicos: perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia.

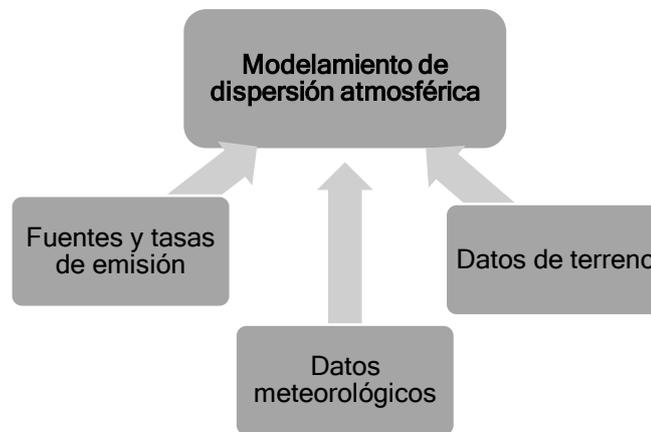
El sistema de modelamiento AERMOD consiste en dos preprocesadores y el modelo de dispersión en sí (Air Permits Division Texas Commission on Environmental Quality, 2019).

Los preprocesadores son:

- El preprocesador AERMET, el cual provee al AERMOD con la información meteorológica necesaria para caracterizar tanto la superficie como la altura. AERMET usa registros meteorológicos y características de la superficie para calcular los parámetros de la capa límite (altura de mezcla, velocidad de fricción, entre otros) necesarios para el modelo. Es necesaria que la información meteorológica usada, ya sea medida en el sitio o fuera del sitio, sea representativa del dominio de modelamiento.
- El preprocesador AERMAP, el cual provee la caracterización tanto del terreno como de la grilla para el AERMOD. AERMAP utiliza datos de terreno grillado para el dominio de modelamiento, en forma de un archivo de elevación digital (DEM), para calcular la altura asociada a cada uno de los receptores, ya sean discretos o grilla.

### III. DESARROLLO DEL TRABAJO

Con el fin de describir la metodología para la elaboración de un modelamiento de dispersión para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto, se consideró que este requiere tres tipos de datos de entrada, principalmente. En la Figura 3 se muestra el diagrama de los datos de entrada de un modelo de dispersión atmosférica.



**Figura 3.** Diagrama de datos de entrada de un modelo de dispersión atmosférica

Es de esta forma, que la presente sección iniciará con la descripción de la metodología para la elaboración del inventario de emisiones; para continuar con la descripción de las características y configuración del modelamiento de dispersión para un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto.

#### 3.1. Inventario de emisiones

Para describir la metodología del inventario, se considera iniciar con la identificación de las fuentes de emisión presentes en un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto, considerando sus procesos y operaciones (Sección III.1.1); para proceder con la descripción de los factores y tasas de emisión a ser considerados para cada una de las fuentes (Sección III.1.2). Estos factores permitirán la estimación de las tasas de emisión para cada una de las fuentes identificadas. En la Figura 4 se muestra el flujograma considerado para la descripción de la metodología del inventario de emisiones.



**Figura 4.** Flujograma de la metodología considerada para la descripción del inventario de emisiones

Es habitual considerar la elaboración del inventario de emisiones para los potenciales contaminantes que se esperan en las fases de construcción y operación de una mina, los cuales se encuentren regulados en los ECA para Aire:  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $NO_x^1$ ,  $SO_2$  y CO (Asif et. al, 2018). Es necesario aclarar que el inventario de emisiones no generará valores comparables con los ECA Aire; puesto que lo que se obtiene son tasas de emisión y no concentraciones.

Cabe mencionar que, al estarse evaluando un proyecto *greenfield* que no ha sido ejecutado y se busca la estimación de emisiones de actividades futuras, el uso de factores de emisión es recomendable (DGAAM, 2007). Los factores de emisión se eligen para cada una de las fuentes priorizadas considerando que sean conservadores y hayan sido publicados por entidades internacionales reconocidas.

### 3.1.1. Fuentes de emisión

En general, las fuentes de emisión son los equipos, actividades y componentes que generan emisiones de material particulado y/o gases al ambiente; las cuales se priorizan de ocurrir la mayor parte del periodo evaluado o en amplias zonas del proyecto.

La identificación y priorización de las fuentes de emisión se basa en la descripción del proyecto, la cual detalla los componentes y procesos que se planean realizar en cada una de las etapas del proyecto. Asimismo, se debe tener en cuenta que, como se trata del soporte para la obtención de un permiso ambiental, es necesario que se estimen las emisiones del peor escenario (máximas emisiones) para cada etapa (DGAAM, 2007). Es por esta razón,

---

<sup>1</sup> En el caso del inventario de emisiones, lo que se calcula son las tasas de emisión de  $NO_x$ , considerando que los factores se encuentran para ese parámetro. Es en el modelamiento donde se obtiene las concentraciones de  $NO_2$ , considerando una metodología específica para la reacción de  $NO_x$  a  $NO_2$ .

que se identifica el periodo (en este caso, año) de mayor actividad, para así estimar las máximas emisiones.

Las principales fuentes de emisión de material particulado y gases identificadas para el año crítico de la etapa de construcción de un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto fueron:

- Tránsito en vías afirmadas, que incluye las emisiones de material particulado por la circulación de vehículos entre componentes por vías no pavimentadas; así como, la circulación de vehículos y equipos dentro de los componentes.
- Combustión en vehículos y equipos, que incluye las emisiones por la combustión interna de vehículos en ruta entre componentes; así como, de los vehículos y equipos que se encuentran en operación dentro de los componentes.
- Transferencias, que incluye las emisiones de material particulado por el movimiento de material (mineral, desmonte, material de canteras, *topsoil*), como excavación, carga y descarga.
- Erosión eólica, que incluye las emisiones de material particulado en pilas de almacenamiento producto de la acción del viento.
- Perforación, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Demolición, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Nivelación, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Generadores eléctricos, que incluye las emisiones producto de la combustión interna de dichos equipos, los cuales son usados ante la falta de energía eléctrica.
- Chancado, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Procesamiento de concreto, que incluye las emisiones de material particulado por el proceso para la producción de concreto.
- Tamizado, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.

Las principales fuentes de emisión de material particulado y gases identificadas para el año crítico de la etapa de operación de un proyecto minero *greenfield* a tajo abierto fueron:

- Tránsito en vías afirmadas, que incluye las emisiones de material particulado por la circulación de vehículos entre componentes por vías no pavimentadas; así como, la circulación de vehículos y equipos dentro de los componentes.
- Combustión en vehículos y equipos, que incluye las emisiones por la combustión interna de vehículos en ruta entre componentes; así como, de los vehículos y equipos que se encuentran en operación dentro de los componentes.
- Transferencias, que incluye las emisiones de material particulado por el movimiento de material (mineral, desmonte, material de canteras, *topsoil*), como excavación, carga y descarga.
- Erosión eólica, que incluye las emisiones de material particulado en pilas de almacenamiento producto de la acción del viento.
- Voladura, que considera las emisiones de material particulado y gases producto de dicha actividad.
- Perforación, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Demolición, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Nivelación, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Chancado, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.
- Tamizado, que incluye las emisiones de material particulado producto de dicha actividad.

Las fuentes de emisión para ambas etapas son bastante similares entre sí; con diferencias puntuales como en el uso de generadores eléctricos y procesamiento de concreto en la etapa de construcción; y voladuras en la etapa de operación. Estas diferencias se centran, principalmente, en la ejecución de obras de la etapa de construcción y en la explotación del tajo en la etapa de operación.

Como se observa, la mayor parte de las fuentes de emisión son actividades generadoras de material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>); mientras que las emisiones de gases (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y CO)

son solo generadas por la combustión de vehículos, equipos y generadores eléctricos, así como, voladuras.

### 3.1.2. Factores y tasas de emisión

Un factor de emisión es una relación entre la cantidad de un contaminante producido por una fuente y el índice de actividad de la fuente (DGAAM, 2007). Con base en los factores de emisión es que se puede obtener la tasa de emisión de la fuente identificada.

A continuación, se describen los factores de emisión utilizados para la estimación de las respectivas tasas de emisión para cada una de las fuentes identificadas; tanto para la etapa de construcción como para la etapa de operación. Asimismo, se detallan los pasos siguientes para poder obtener el valor de la tasa de emisión correspondiente a la fuente.

#### a) Tránsito en vías afirmadas

Para la estimación de las emisiones por el tránsito de vehículos sobre vías no pavimentadas (afirmadas), se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 13.2.2 *Unpaved Roads* (US EPA, 2006a). Con la Ecuación 1 se puede estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(PM_{10}, PM_{2,5}) = k * \left(\frac{s}{12}\right)^a * \left(\frac{W}{3}\right)^b * 281,9 \quad (1)$$

Donde:

- FE = factor de emisión sin control (g/VKT)
- k = constante dependiente del tamaño de partículas (1,5 lb/VMT para PM<sub>10</sub> y 0,15 lb/VMT para PM<sub>2,5</sub>)
- s = contenido de finos en superficie del acceso (%), el cual debe ser obtenido en un laboratorio mediante un análisis granulométrico del suelo
- W = peso del vehículo promedio (ton)
- a = constante empírica (sin unidades, 0,9 para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>)
- b = constante empírica (sin unidades, 0,45 para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>)
- 281,9 = factor de conversión aplicado de lb/VMT a g/VKT
- VKT = kilómetro recorrido por vehículos

Los valores de contenido de finos (material en las vías que puede ser suspendido producto del tránsito de vehículos) y peso del vehículo se obtienen con base en la información de la descripción del proyecto. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada uno de los vehículos que transiten por las vías afirmadas del proyecto.

A partir del FE, se puede considerar la adición de medidas de control de emisiones, de ser necesario. Para todos los casos, de considerarse el uso de medidas de control, se deberá considerar la Ecuación 2:

$$FEC = FE * \left(1 - \frac{C}{100}\right) \quad (2)$$

Donde:

FEC = factor de emisión con control (g/VKT)

FE = factor de emisión sin control (g/VKT)

C = eficiencia de las medidas de control (%)

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en g/VKT) por los kilómetros recorrido por vehículo y dividirlo por las horas al día en las que el vehículo va a operar; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

b) Combustión en vehículos en ruta y de equipos fuera de ruta

Para la estimación de las emisiones por la combustión en vehículos en y equipos fuera de ruta, se considera la metodología propuesta en *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition* (US EPA, 2010). Con las Ecuaciones 3 a 6 se puede estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(HC, CO, NO_x) = FE_{ss} * TAF * DF \quad (3)$$

$$FE(PM_{10}, PM_{2,5}) = FE_{ss} * TAF * DF * SPM_{adj} \quad (4)$$

$$FE(SO_2) = [BSFC * 453,6 * (1 - soxcnv) - FE(HC)] * 0,01 * soxsdl * 2 \quad (5)$$

$$SPM_{adj} = BSFC * 453,6 * 7 * soxcnv * 0,01 * (soxbas - soxsdl) \quad (6)$$

Donde:

- FE = factor de emisión sin control (g/hp-h)
- EFss = factor de emisión de estado estacionario (g/hp-h)
- TAF = factor de ajuste transitorio (sin unidades)
- DF = factor de deterioro (sin unidades)
- SPMadj = factor de ajuste para variaciones en el contenido de azufre (g/hp-hr)
- BSFC = consumo de combustible específico del freno (lb combustible/hp-h)
- soxcnv = relación entre los gramos de azufre en PM y gramos de azufre en el combustible consumido (considerado como 0,02247)
- soxbas = certificación por defecto del porcentaje en peso de azufre en el combustible para los motores diésel (considerado como 0,33 % para Tier 1 y 2; 0,0015 % para Tier 3 y 4)
- soxsdl = porcentaje de peso de azufre en el combustible (%)

Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada uno de los vehículos y equipos que se hayan definido como representativos en cada etapa del proyecto.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en g/hp-h) por el número de vehículos/equipos y la potencia de su motor; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

### c) Transferencia

Para la estimación de las emisiones por las actividades de transferencia de materiales, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 13.2.4 *Aggregate Handling and Storage Piles* (US EPA, 2006b). Con la Ecuación 7 se puede estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(\text{PM}_{10}, \text{PM}_{2,5}) = k * 0,0016 * \left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3} \left(\frac{M}{2,0}\right)^{1,4} \quad (7)$$

Donde:

- FE = factor de emisión sin control (kg/t)
- k = constante dependiente del tamaño de partículas (sin unidades, 0,35 para PM<sub>10</sub> y 0,053 para PM<sub>2,5</sub>)
- U = velocidad del viento promedio (m/s)
- M = contenido de humedad del material transferido (%), el cual debe ser obtenido en un laboratorio mediante un análisis de humedad del material

Los valores de velocidad del viento promedio y contenido de humedad del material se obtienen con base en los registros de la estación meteorológica local y la información de la descripción del proyecto, respectivamente. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada una de las transferencias de material consideradas en la etapa evaluada del proyecto.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en kg/t) por el número de transferencias y el movimiento de material por día, y dividirlo por las horas al día en las que se dará la transferencia; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

#### d) Erosión del viento

Para la estimación de las emisiones por la erosión del viento, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 13.2.5 *Industrial Wind Erosion* (US EPA, 2006c). Con las Ecuaciones 8 a 10 se pueden estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(PM_{10}, PM_{2,5}) = k \sum_{i=1}^N P_i \quad (8)$$

$$P = 58(u^* - u_t^*)^2 + 25(u^* - u_t^*); \text{ si } u^* > u_t^* \quad (9)$$

$$P = 0; \text{ si } u^* \leq u_t^* \quad (10)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$ )

P = potencial de erosión ( $\text{g}/\text{m}^2$ )

$u^*$  = velocidad de fricción ( $\text{m}/\text{s}$ )

$u^*t$  = umbral de la velocidad de fricción ( $\text{m}/\text{s}$ )

k = constante dependiente del tamaño de partículas (sin unidades, 0,5 para  $\text{PM}_{10}$  y 0,075 para  $\text{PM}_{2,5}$ )

La estimación del factor de emisión deberá considerar los registros horarios de la velocidad del viento de la estación meteorológica local. Cabe mencionar que el factor de emisión se calcula como uno para todas las pilas identificadas; debido que su cálculo se basa en los registros de la estación meteorológica local.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en  $\text{g}/\text{m}^2/\text{año}$ ) por el número de pilas y su superficie, y dividirlo por las horas de exposición de esta; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

#### e) Voladura

Para la estimación de las emisiones por voladura, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 11.9 *Western Surface Coal Mining* (US EPA, 1998a) para material particulado y Sección 13.3 *Explosives Detonation* (US EPA, 1995) para gases. Con la Ecuación 11 se puede estimar y en las Ecuaciones 12 a 14 se muestran los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(\text{PM}_{10}, \text{PM}_{2,5}) = 0,00022 * A^{1,5} * B \quad (11)$$

$$FE(\text{NO}_x) = 8,0 \quad (12)$$

$$FE(\text{CO}) = 34,0 \quad (13)$$

$$FE(\text{SO}_2) = 1,0 \quad (14)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (kg/voladura, para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>; kg/Mg, para NO<sub>x</sub>, CO y SO<sub>2</sub>)

A = área de voladura (m<sup>2</sup>)

B = constante dependiente del tamaño de partículas (sin unidades, 0,52 para PM<sub>10</sub> y 0,03 para PM<sub>2,5</sub>)

El área de voladura se obtiene con base en la información de la descripción del proyecto. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada una de las áreas donde se haya planificado contar con voladuras.

Para el caso del material particulado, a partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión; por lo que se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en kg/voladura) por el número de voladuras por día; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar. Para el caso de los gases, el factor de emisión recomendado (el cual se encuentra en kg/Mg) se multiplicará por el consumo de explosivos por voladura y el número de voladuras por día; con el mismo fin mencionado previamente.

#### f) Perforación

Para la estimación de las emisiones por perforación, se considera la metodología propuesta en el *Emission Estimation Technique Manual for Mining* (Australian Government, 2012). En las Ecuaciones 15 y 16 se muestran los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,31 \quad (15)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 0,031 \quad (16)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (kg/taladro perforado)

El factor de emisión recomendado (el cual se encuentra en kg/taladro perforado) se multiplicará por el número de taladros por día, con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

### g) Demolición

Para la estimación de las emisiones por las actividades de demolición, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 11.9 *Western Surface Coal Mining* (US EPA, 1998a). Con las Ecuaciones 17 y 18 se pueden estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,45 * \left( \frac{s^{1,5}}{M^{1,4}} \right) * B \quad (17)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 2,6 * \left( \frac{s^{1,2}}{M^{1,3}} \right) * B \quad (18)$$

Donde:

- FE = factor de emisión sin control (kg/h)
- s = contenido de finos del material (%), el cual debe ser obtenido en un laboratorio mediante un análisis granulométrico del suelo
- M = contenido de humedad del material (%), el cual debe ser obtenido en un laboratorio mediante un análisis de humedad del suelo
- B = constante dependiente del tamaño de partículas (sin unidades, 0,75 para  $PM_{10}$  y 0,105 para  $PM_{2,5}$ )

Los valores de contenido de finos y contenido de humedad del material se obtienen con base en la información de la descripción del proyecto. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada frente donde se realice demolición en el proyecto.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en kg/h) por el número de unidades, con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

### h) Nivelación

Para la estimación de las emisiones por las actividades de nivelación, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 11.9 *Western Surface Coal Mining* (US EPA, 1998a). Con las Ecuaciones 19 y 20 se pueden estimar los factores de emisión para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,0056 * S^2 * B \quad (19)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 0,0034 * S^{2,5} * B \quad (20)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (kg/VKT)

S = velocidad media de la motoniveladora (km/h)

B = constante dependiente del tamaño de partículas (sin unidades, 0,6 para PM<sub>10</sub> y 0,031 para PM<sub>2,5</sub>)

La velocidad media de la motoniveladora se obtiene con base en la información de la descripción del proyecto. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente para cada frente donde se realice nivelación, tomando en cuenta la velocidad del equipo en cada zona.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En este caso, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en kg/VKT) por los kilómetros recorrido por la motoniveladora y dividirlo por las horas al día en las que el equipo va a operar; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

#### i) Generadores eléctricos

Para la estimación de las emisiones por el uso de generadores eléctricos, se considera la metodología propuesta en *Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards* (US EPA, 2016d). En las Ecuaciones 21 a 24 se muestran los factores de emisión para PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y CO, y con la Ecuación 25 se puede estimar el factor de emisión para SO<sub>2</sub> para esta fuente:

$$FE(PM_{10}, PM_{2,5}) = 0,20 \quad (21)$$

$$FE(NO_x) = 6,4 \text{ (para potencia de motor } < 800 \text{ kW)} \quad (22)$$

$$FE(NO_x) = 4,0 \text{ (para potencia de motor } > 800 \text{ kW)} \quad (23)$$

$$FE(CO) = 3,5 \quad (24)$$

$$FE(SO_2) = CC * DC * SC * 2 \quad (25)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (g/kW-h para PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub> y CO, y kg/h para SO<sub>2</sub>)

CC = consumo de combustible (L/h)

DC = densidad del combustible (kg/L)

SC = contenido de azufre en el combustible (%)

El consumo de combustible se obtiene con base en la información de la descripción del proyecto. Cabe mencionar que el factor de emisión deberá ser calculado independientemente, dependiendo de la potencia del motor del generador.

A partir de la obtención del factor de emisión (sin o con control), este debe ser multiplicado por su índice de actividad para poder obtener la tasa de emisión. En el caso del material particulado, CO y NO<sub>x</sub>, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en g/kW-h) por la potencia y número de generadores; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar. En el caso del SO<sub>2</sub>, se considera multiplicar el factor de emisión (el cual se encuentra en kg/h) por el número de generadores; con el mismo fin previamente mencionado.

#### j) Chancado

Para la estimación de las emisiones por el chancado de material, se considera la metodología propuesta en *Fugitive Dust Handbook* (Western Regional Air Partnership, 2006) para chancado primario. En las Ecuaciones 26 y 27 se muestran los factores de emisión para PM<sub>10</sub> y con la Ecuación 28 se puede estimar el factor de emisión para PM<sub>2,5</sub> para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,025 \quad (\text{para materiales con contenido de humedad } <4\%) \quad (26)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,0045 \quad (\text{para materiales con contenido de humedad } >4\%) \quad (27)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 0,15 * FE(PM_{10}) \quad (28)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (kg/Mg)

El factor de emisión recomendado (el cual se encuentra en kg/Mg) se multiplicará por la cantidad de material procesado por día y el número de chancadoras, y se dividirá por las horas al día en las que se dará el chancado; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

k) Procesamiento de concreto

Para la estimación de las emisiones por los procesos para la producción de concreto, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 11.12 *Concrete Batching* (US EPA, 2004). En las Ecuaciones 29 a 34 se muestran los factores de emisión para PM<sub>10</sub> y con la Ecuación 35 se puede estimar el factor de emisión para PM<sub>2,5</sub> para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,0017 \text{ para la transferencia de agregados} \quad (29)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,00051 \text{ para la transferencia de agregados} \quad (30)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,00017 \text{ para la carga de cemento} \quad (31)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,0024 \text{ para la carga de complemento de cemento} \quad (32)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,0028 \text{ para la carga de concreto} \quad (33)$$

$$FE(PM_{10}) = 0,0131 \text{ para la descarga de camiones} \quad (34)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 0,15 * FE(PM_{10}) \quad (35)$$

Donde:

FE = factor de emisión sin control (kg/Mg)

El factor de emisión recomendado (el cual se encuentra en kg/Mg) se multiplicará por la cantidad de material específico considerado por día y el número de chancadoras, y dividirlo por las horas al día en las que se dará el procesamiento de concreto; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

### l) Tamizado

Para la estimación de las emisiones por el tamizado de material, se considera la metodología propuesta en AP-42, Sección 11.19.2 *Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing* (US EPA, 1998b). En la Ecuación 36 se muestra el factor de emisión para PM<sub>10</sub> y con la Ecuación 37 se puede estimar el factor de emisión para PM<sub>2,5</sub> para esta fuente:

$$FE(PM_{10}) = 0,0043 \quad (36)$$

$$FE(PM_{2,5}) = 0,15 * FE(PM_{10}) \quad (37)$$

Donde:

$$FE = \text{factor de emisión sin control (kg/Mg)}$$

El factor de emisión recomendado (el cual se encuentra en kg/Mg) se multiplicará por la cantidad de material tamizado por día, y dividirá por las horas al día en las que se dará el tamizado; con el fin de uniformizar las unidades de las emisiones y poder sumar.

A partir de las tasas de emisión estimadas para cada una de las fuentes, se procede a sumar por parámetro para obtener las emisiones totales de material particulado y gases para los años críticos de las etapas consideradas. Esto también permitirá poder agrupar las emisiones no solo por las actividades que las generan, sino también por la ubicación en la que se da; lo cual es importante para el modelamiento.

### 3.2. Modelamiento de dispersión

Para describir las características del modelo de dispersión usado y la configuración seguida para la realización del modelamiento, se considera iniciar con la descripción del modelo y sus supuestos (Sección III.2.1); continuar con la descripción de los principales inputs del modelo (Sección III.2.2); seguir con la descripción de la configuración y ejecución del modelo de dispersión (Sección III.2.3); para finalizar con la descripción de los resultados del modelamiento (Sección III.2.4). En la Figura 5 se muestra el flujograma considerado para la descripción de la metodología del inventario de emisiones.



**Figura 5.** Flujograma de la metodología considerada para la descripción del modelamiento de dispersión

### 3.2.1. Modelo de dispersión AERMOD

Como se mencionó previamente, el modelo de dispersión AERMOD es uno de los recomendados con el fin de permisos ambientales en diferentes países (US EPA, 2018; Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2017; Alberta Environment and Parks, 2021).

En general, los pasos para realizar un modelamiento de dispersión con AERMOD son los siguientes (Ontario Ministry of the Environment and Climate Change, 2017):

- a) Identificar y cuantificar las emisiones del proyecto.
- b) Procesar la información meteorológica usando AERMET.
- c) Obtener información de altitudes desde un modelo digital de terreno.
- d) Caracterizar el sitio, considerando la información completa sobre cada una de las fuentes y receptores.
- e) Realizar el preprocesamiento de la información de terreno usando AERMAP.
- f) Correr el modelo.
- g) Visualizar y analizar los resultados.

A continuación, se listan los principales supuestos y limitaciones del modelo y de sus datos de entrada:

- a) Falta de información vertical de viento, temperatura, estabilidad y turbulencia; debido a que son variables que no suelen medirse.
- b) Consideración de la ubicación del proyecto como una zona rural, debido a las condiciones generales del área;
- c) Consideración del tipo de terreno como complejo, puesto que se identifican altitudes diferentes para las fuentes como para los receptores.

### 3.2.2. Datos de entrada del modelo de dispersión

Los principales datos de entrada (o *inputs*) del modelo de dispersión son tres: fuentes de emisión, datos meteorológicos y terreno. A continuación, se describen cada uno de ellos.

#### a) Fuentes de emisión

Como se mencionó previamente, la estimación de las tasas de emisión por actividad generadora en el inventario permite que estas puedan ser agrupadas por ubicación o zona donde esta se dará. Para el ingreso de las emisiones en el modelo de dispersión, es necesario que las fuentes representen la naturaleza de la emisión y se clasifiquen de la siguiente manera:

- Fuentes de tipo área: asignada a las fuentes estacionarias que sean representadas como áreas (se considera que emiten desde la superficie).
- Fuente de tipo volumen: asignada a las fuentes estacionarias que sean representadas como volúmenes (se considera que emiten desde una altura diferente a la superficie).
- Fuente de tipo puntual: asignada a las fuentes estacionarias emitidas por ductos o chimeneas.
- Fuente de tipo tajo: asignada a los tajos que se vayan a modelar
- Fuente de tipo lineal-volumen: asignada a vías donde circulan vehículos, considerando las emisiones por el tránsito en vías y la combustión de vehículos. Es considerada como una cadena de fuentes volumen, una inmediatamente tras la otra, hasta completar la ruta que se desea modelar.

Para cada una de las fuentes se debe indicar en el modelo de dispersión su ubicación, dimensiones y tasas de emisión. Cabe mencionar que las fuentes van acorde con las características del componente del proyecto que simula.

#### b) Datos meteorológicos

A partir de los registros de la estación meteorológica local, se seleccionan tres años, conforme a lo señalado en el Manual técnico para la elaboración de documentos técnicos sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos (SENAMHI, 2021). Es recomendable considerar los últimos años registrados que se encuentren completos y sean consistentes.

Para el modelamiento de dispersión se hace necesario contar con registros meteorológicos a nivel horario, de las variables temperatura, humedad relativa, viento, radiación solar, presión atmosférica, precipitación y nubosidad. Asimismo, es recomendable contar con registros de temperatura y viento en altura.

Esta información es ingresada al preprocesador de información meteorológica AERMET para poder generar los archivos en superficie y en altura que serán ingresados al modelo.

#### c) Datos de terreno

La información del terreno se procesa mediante un archivo DEM, generado a partir de la información de elevación del terreno, considerando el relieve natural y la evolución de los componentes del proyecto para cada uno de los escenarios.

Esta información es ingresada al preprocesador de terreno digital AERMAP, donde asigna las elevaciones a cada una de las fuentes y receptores ingresados al modelo.

#### 3.2.3. Configuración del modelo

Para iniciar la configuración del modelo, se considera definir un dominio pertinente para las dimensiones del proyecto, tomando en cuenta que el polígono deberá cubrir todos los componentes, receptores y áreas de interés. Como ejemplo, se puede considerar un dominio de 25 km x 25 km, centrado en la ubicación de la futura unidad minera.

Sobre el dominio definido se agregarán los datos de entrada antes mencionados (fuentes de emisión, datos meteorológicos y terreno). Asimismo, para obtener las concentraciones resultantes del modelo, es necesario la implementación de una grilla de receptores y receptores sensibles (viviendas, infraestructuras, centros poblados, entre otros priorizados). Como ejemplo, se considera una grilla con receptores cada 500 m y 20 receptores sensibles. Cabe mencionar que los receptores deben ser considerados fuera de la huella del proyecto minero, debido a que el área considerada dentro del proyecto trataría de calidad de aire ocupacional (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019). Para permisos, lo que se evalúa es la calidad del aire ambiental (fuera del área de la mina), por lo que se compara con los ECA Aire.

Para cada uno de los parámetros y etapa considerada, deberá hacerse un archivo de entrada (.adi) independiente. Si bien los datos meteorológicos y de terreno serán los mismos para todos los parámetros, las fuentes y tasas de emisión variarán. A continuación, se detallan las consideraciones para cada uno de los parámetros.

- Para PM<sub>10</sub>, se deberá obtener la primera y octava concentración máximas en 24 horas para cada uno de los años modelados, considerando los ECA Aire. Asimismo, se deberá obtener la concentración anual para cada uno de los años modelados. Para material particulado, se consideran todas las fuentes de emisión mencionadas en la sección III.1.1.
- Para PM<sub>2,5</sub>, se deberá obtener la primera y octava concentración máximas en 24 horas para cada uno de los años modelados, considerando los ECA Aire. Asimismo, se deberá obtener la concentración anual para cada uno de los años modelados. Para material particulado, se consideran todas las fuentes de emisión mencionadas en la sección III.1.1.
- Para NO<sub>2</sub>, se deberá obtener la primera y vigésimo quinta concentración máximas en 1 hora para cada uno de los años modelados, considerando los ECA Aire. Asimismo, se deberá obtener la concentración anual para cada uno de los años modelados. Para gases, se consideran las fuentes de emisión que incluyen combustión y/o voladura, dependiendo del escenario. Cabe mencionar que, como las emisiones son de NO<sub>x</sub> y se modelará NO<sub>2</sub>, se considera el uso del método limitante de ozono para obtener las concentraciones de NO<sub>2</sub>. Este método asume que una fracción de las emisiones de NO<sub>x</sub> se encuentran en la forma de NO<sub>2</sub> y el balance restante en la forma de NO; y posteriormente, el NO reacciona rápidamente con el ozono ambiental para formar NO<sub>2</sub> adicional.
- Para SO<sub>2</sub>, se deberá obtener la primera y octava concentración máximas en 24 horas para cada uno de los años modelados, considerando los ECA Aire. Para gases, se consideran las fuentes de emisión que incluyen combustión y/o voladura, dependiendo del escenario.
- Para CO, se deberá obtener la primera y segunda concentración máximas en 1 hora para cada uno de los años modelados, así como, la primera concentración máxima en 8 horas, considerando los ECA Aire. Para gases, se consideran las fuentes de emisión que incluyen combustión y/o voladura, dependiendo del escenario.

Luego de realizarse y comprobarse que el archivo de entrada no genera errores, se procede con la corrida. Cabe mencionar que es necesario que en la ruta del archivo de entrada se encuentren los archivos meteorológicos en superficie (.sfc) y en altura (.pfl); así como, el archivo de receptores (.rou). Todos los detalles correspondientes a la fuente de emisión y parámetro se encuentran en el archivo de entrada (.adi).

#### 3.2.4. Resultados del modelo

Luego de realizarse la corrida se obtiene un archivo de salida (.ado), con los resultados para cada uno de los receptores; archivos gráficos (.plt), con los resultados necesarios para graficar las isolíneas para los periodos configurados; archivo de errores (.err); y archivo resumen (.sum). El tiempo de procesamiento de cada uno de los archivos de entrada dependerá de la cantidad de fuentes de emisión y receptores; así como, del parámetro modelado y de las capacidades del computador donde se realice la corrida.

En el archivo de salida y de resumen se menciona, entre otros, los resultados obtenidos para cada uno de los receptores grilla y sensibles, considerando las fuentes y tasas de emisión identificadas para el parámetro, para cada uno de los periodos configurados. Cabe mencionar que también se menciona la fecha y hora para la cual se estima la máxima concentración, pudiendo dar una idea de las condiciones meteorológicas que determinaron se obtenga ese resultado.

Es con base en estos resultados que, con frecuencia, se procede a graficar isolíneas de concentraciones máximas, con las cuales se muestra la dispersión que podría darse en el peor escenario del respectivo parámetro. Generalmente, los mayores aportes se dan inmediatamente al límite de la huella del proyecto minero, disminuyendo conforme se aleja de este. Se espera que las concentraciones fuera de la huella del proyecto siempre se encuentren por debajo de los ECA Aire, para así asegurar que el proyecto no afectará a ninguno de los receptores sensibles. Se recomienda que las concentraciones modeladas representen solo el 25 % del ECA Aire respectivo, para así permitir la implementación de varios proyectos en la misma área de interés (International Finance Corporation, 2007).

Por otra parte, es relevante considerar que el análisis de las concentraciones máximas en los receptores deben ser complementadas con las concentraciones de fondo, para así poder comparar las concentraciones totales (las que son producto de las emisiones generadas por el proyecto; más, las que son producto de las emisiones que no se dan por el proyecto) con el respectivo ECA Aire. Las concentraciones modeladas son las que serán ocasionadas por la construcción/operación del proyecto; mientras que las concentraciones de fondo son las ocasionadas por actividades que se dan previamente en la zona.

Es importante reconocer la posibilidad de que se generen diversos errores al realizar la corrida. En muchos casos, solo se tratan de avisos (*warnings*), los cuales son con motivo informativo; sin embargo, no generan ningún tipo de impacto en los resultados finales del

modelo (por ejemplo: que se considera una opción específica del modelo, que los registros de viento presentan calmas dentro de la información meteorológica, que hace falta datos meteorológicos, entre otros).

## IV. CONCLUSIONES

- 1) Se describió, bajo la experiencia profesional adquirida, la elaboración de un inventario de emisiones usando factores de emisión para un proyecto minero *greenfield*, el cual sea parte de los datos de entrada para el modelamiento de dispersión.

Se describió la metodología para estimar las emisiones de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y CO mediante el uso de factores de emisión para el escenario de máximas emisiones de las etapas de construcción y operación del proyecto. Las principales fuentes de emisión identificadas, para ambos escenarios, fueron tránsito sobre vías afirmadas, combustión en vehículos y equipos, transferencias, erosión eólica, perforación, demolición, nivelación, generadores eléctricos, chancado, procesamiento de concreto, tamizado y voladura. Con base en las tasas de actividad y los factores de emisión, se calculan las tasas de emisión para cada una de las fuentes.

- 2) Se describió, bajo la experiencia profesional adquirida, las características y configuración del modelo de dispersión AERMOD, elegido para un proyecto minero *greenfield*.

Se describió la metodología tomando en cuenta el modelo de dispersión AERMOD, debido a sus recomendaciones para fines de permisos ambientales. Este modelo requiere de las características de las fuentes de emisión, con su respectiva tasa de emisión; datos meteorológicos horarios de al menos tres años; y, datos de terreno en formato DEM, para las características de las fuentes de emisión y receptores. Se debe crear un archivo de entrada (.adi) para cada uno de los parámetros a ser evaluados, debido a que se consideran condiciones específicas para cada caso. Se procede a correr, dando como resultado un archivo de salida (.ado), donde se encuentra los resultados para cada uno de los receptores considerados (ya sean grilla o receptores sensibles); y, archivos gráficos (.plt). Con base en el archivo de salida de resultados, se puede analizar el momento y ubicación en la que se da las mayores concentraciones resultantes para cada parámetro; mientras que, los archivos gráficos permiten graficar isóneas de concentraciones máximas.

## V. RECOMENDACIONES

- Es importante poder contar con información meteorológica horaria de calidad dentro del área del proyecto. La calidad del modelamiento de dispersión depende, entre otros, en la calidad de los registros meteorológicos con los que se cuenta. Es relevante tomar en cuenta que la instalación de una estación meteorológica en el área del proyecto debe considerar que su ubicación pueda mantenerse cuando el proyecto esté operando. Es necesario considerar un lugar donde no se vea afectado por barreras ni tránsito de personas o vehículos. Asimismo, realizar limpieza de los instrumentos de medición de la estación meteorológica y mantenimiento anual de estos, no debe pasar desapercibido. Cabe mencionar que es relevante considerar el cambio de los sensores cuando estos ya no están funcionando correctamente; así como, el correcto análisis de calidad de los registros de la estación meteorológica en cuestión.
- La falta de registros de datos en altura de temperatura y viento es un problema en el país. Cabe considerar que, si bien se puede obtener información en altura de modelos meteorológicos, el no tener datos con los cuales poder comparar lo modelado genera incertidumbre. Es necesario que, ante la necesidad de generar modelos de dispersión de aire para los permisos ambientales y la publicación de manuales, se puedan dar las herramientas necesarias para contar con registros en altura de las principales variables meteorológicas.
- Para fines de certificación ambiental, es importante que se considere el peor escenario de emisiones para cada etapa. Es necesario que se tenga un enfoque conservador al elaborar las herramientas, puesto que con base en estos resultados se evaluará el potencial impacto a la calidad ambiental del aire que el proyecto pueda tener y es preferible que se obtengan los peores resultados.
- La identificación de las principales fuentes de emisión deber ser tomado con relevancia. La correcta identificación de estas permite que, tanto el inventario como el modelamiento puedan ser lo más precisos posible, con la información que se cuenta disponible.

- Es recomendable realizar una actualización del inventario de emisiones y el modelamiento de dispersión cuando el proyecto esté operando; especialmente si es que las concentraciones estimadas en los receptores se ven superadas, según el monitoreo comprometido. De esta forma, se podrá refinar el modelamiento con datos más específicos de la construcción u operación del proyecto.
- Se debe considerar que las características del modelo de dispersión dependerán del proyecto. Si bien AERMOD es el modelo recomendado para permisos ambientales, este modelo no es la mejor opción cuando los receptores sensibles se encuentran a más de 50km de las fuentes de emisión.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Permits Division Texas Commission on Environmental Quality. (2019). *Air Quality Modeling Guidelines*. Recuperado de <https://www.tceq.texas.gov/assets/public/permitting/air/Modeling/guidance/airquality-mod-guidelines6232.pdf>
- Alberta Environment and Parks. (2021). *Air quality model guidelines*. Government of Alberta. Recuperado de <https://open.alberta.ca/dataset/download/aep-aqmg-air-quality-model-guideline-2021-09.pdf>
- Asif, Z., Chen, Z., & Han, Y. (2018). Air quality modeling for effective environmental management in the mining region. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68:9, 1001-1014. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1463301>
- Altiti, A., Alrawashdeh, R., & Alnawafleh, H. (2021). *Open Pit Mining*. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/349446634\\_Open\\_Pit\\_Mining](https://www.researchgate.net/publication/349446634_Open_Pit_Mining)
- Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y Establecen Disposiciones Complementarias (7 de junio de 2017). Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-003-2017-MINAM.pdf>
- Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. (2007). *Guía para la evaluación de impactos en la calidad del aire por actividades minero-metalúrgicas*. Ministerio de Energía y Minas. Recuperado de [http://www.minem.gob.pe/minem/DGAAM/guias/VXXI\\_Calidad\\_Aire.pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/DGAAM/guias/VXXI_Calidad_Aire.pdf)
- International Finance Corporation. (2007). General EHS guidelines: Environmental - Air emissions and ambient air quality. *Environmental, Health, and Safety Guidelines*. World Bank Group. Recuperado de <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/>
- Ley N° 28611. Ley General del Ambiente (21 de abril de 2017). Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>

- Mineral Resources Education Program of BC. (2022). *Mining Methods*. Recuperado de <https://mineralsed.ca/learning-resources/mining101/mineral-resources/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2015). *Términos de referencia comunes para los estudios de impacto ambiental detallados (categoría III) de proyectos de explotación, beneficio y labor general mineros metálicos a nivel de factibilidad*. Resolución Ministerial No. 116-2015-MEM/DM. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/publicaciones/Terminos%20de%20Referencia/4.1.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Glosario Técnico Minero*. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosariominero.pdf>
- Ministerio del Ambiente. (2019). *Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire*. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-supremo-que-aprueba-protocolo-nacional-monitoreo-calidad>
- Ontario Ministry of the Environment and Climate Change. (2017). *Air Dispersion Modelling Guideline for Ontario*. Recuperado de: [https://files.ontario.ca/admgo-id50\\_aoda\\_v2b.pdf](https://files.ontario.ca/admgo-id50_aoda_v2b.pdf)
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2016). *La vinculación y la retroalimentación entre la certificación y la fiscalización ambiental*. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú. [http://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=17031](http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=17031)
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *La industria de la minería en el Perú: 20 años de contribución al crecimiento y desarrollo económico del país*. Recuperado de [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Mineria-Peru-20anos.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Industria-Mineria-Peru-20anos.pdf)
- Resolución Ministerial N° 116-2015-MEM/DM. Aprueban Términos de Referencia Comunes para la elaboración de EIA Detallados y Semidetallados de las Actividades de Exploración, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero y otros, en cumplimiento del D.S. N° 040-2014-EM (13 de marzo de 2015). Recuperado de [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/95186/RM\\_116\\_2015\\_DM.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/95186/RM_116_2015_DM.pdf)

- Rumbo Minero. (2022). *PDAC 2022: En 2025 las inversiones mineras en Perú llegarían a US\$ 6.700 millones*. <https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/pdac-2022-2025-inversiones-mineras-peru-6700-millones/>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. (2021). *Manual técnico para la elaboración de documentos técnicos sobre modelamiento de dispersión de contaminantes atmosféricos*. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00701SENA-1377.pdf>
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (s.f.-a). *Etapas de la minería*. <https://www.mineriadetodos.com.pe/images/galeria/1537565942.jpg>
- Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (s.f.-b). *¿Cómo producimos?*. <https://www.mineriadetodos.com.pe/images/galeria/1537565968.jpg>
- United States of America Environmental Protection Agency. (1998a). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 11: Mineral Products Industry, Section 11.9. Western Surface Coal Mining*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/c11s09.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (1998b). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 11: Mineral Products Industry, Section 11.9.2 Crushed Stone Processing and Pulverized Mineral Processing*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/c11s1902.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2004). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 11: Mineral Products Industry, Section 11.12 Concrete Batching*. Recuperado de <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/c11s12.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2006a). *AP-42: Compilation of Air Pollution Emission Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous Sources, Section 13.2.2. Emissions Factors for Unpaved Roads*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0202.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2006b). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous*

- Sources, Section 13.2.4 Aggregate Handling and Storage Piles*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0204.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2006c). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors, Fifth Edition, Volume I, Chapter 13: Miscellaneous Sources, Section 13.2.5 Industrial Wind Erosion*. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch13/final/c13s0205.pdf>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2006d). *Nonroad Compression-Ignition Engines: Exhaust Emission Standards. EPA-420-B-16-022. Office of Transportation and Air Quality*. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100OA05.PDF?Dockey=P100OA05.PDF>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2010). *Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Compression-Ignition (EPA-420-R-10-018 NR-009d)*. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10081UI.PDF?Dockey=P10081UI.PDF>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2017). *Revisions to the guideline on air quality models: Enhancements to the AERMOD dispersion modeling system and incorporation of approaches to address ozone and fine particulate. Annex W: 40 CFR Part 51*. Recuperado de [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw\\_17.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-09/documents/appw_17.pdf)
- United States of America Environmental Protection Agency. (2018). *AERMOD Model Formulation and Evaluation*. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100UT95.PDF?Dockey=P100UT95.PDF>
- United States of America Environmental Protection Agency. (2022). *Managing Air Quality - Emissions Inventories*. Recuperado de <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-emissions-inventories>
- United States of America Environmental Protection Agency. (s.f.-a). *Air quality dispersion modeling*. Recuperado de <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>
- United States of America Environmental Protection Agency. (s.f.-b). *Air quality models*. Recuperado de <https://www.epa.gov/scram/air-quality-models>

United States of America Environmental Protection Agency. (s.f.-c). *Modeling applications and tools*. Recuperado de <https://www.epa.gov/scram/modeling-applications-and-tools>

Western Regional Air Partnership. (2006). *Fugitive Dust Handbook*. Recuperado de [https://www.wrapair.org/forums/dejf/fdh/content/FDHandbook\\_Rev\\_06.pdf](https://www.wrapair.org/forums/dejf/fdh/content/FDHandbook_Rev_06.pdf)