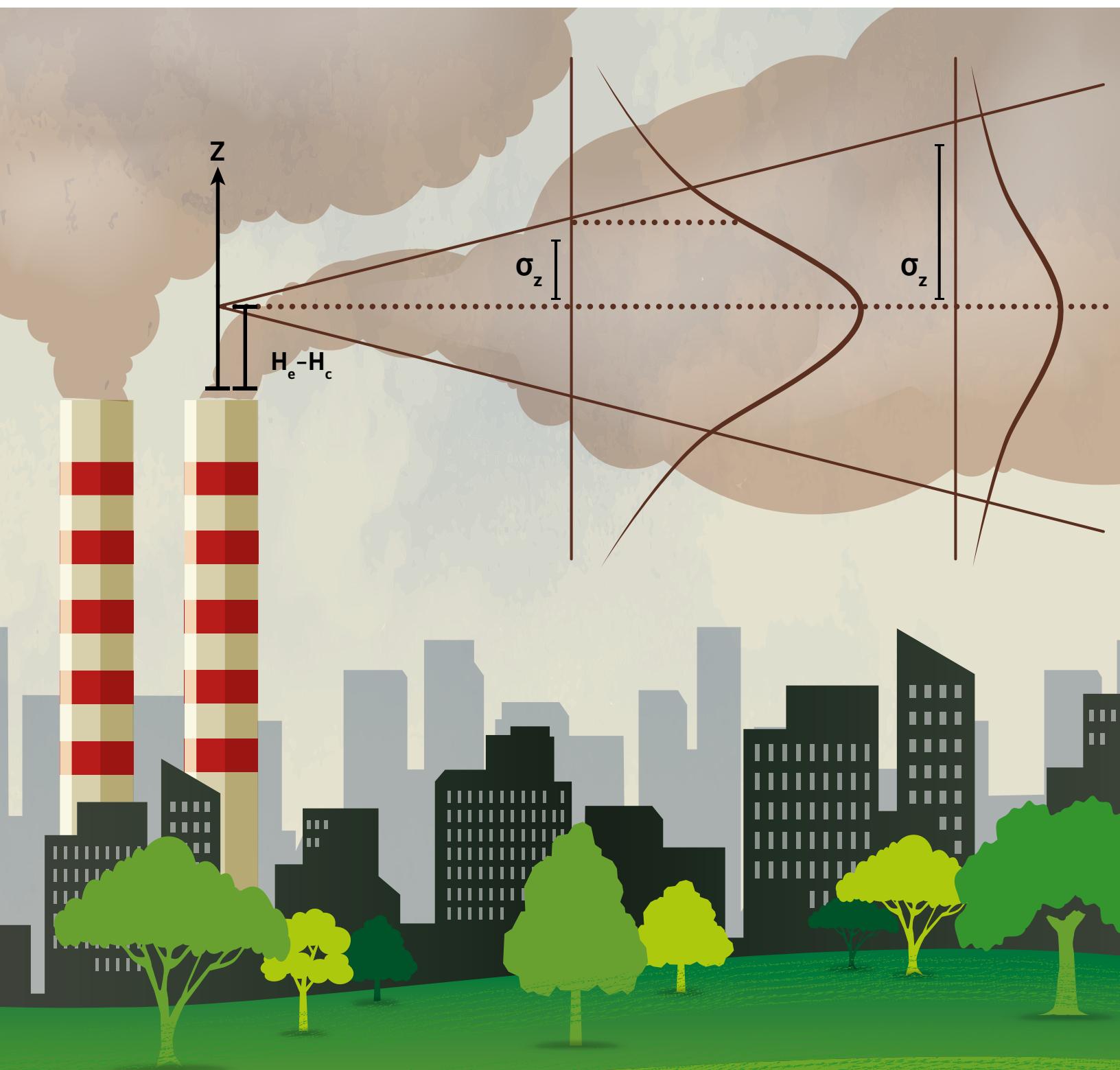




METODOLOGÍA / MODELO

GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE EN EL SEIA





GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE EN EL SEIA

Autor: Servicio de Evaluación Ambiental

Segunda Edición

Santiago, febrero 2023

Diseño y diagramación: Servicio de Evaluación Ambiental

Fotografías: Adobe Stock, Deposiphotos, Unplash.

Si desea presentar alguna consulta, comentario o sugerencia respecto del documento, por favor, escribir al siguiente correo **comentarios.documentos@sea.gob.cl**

GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE EN EL SEIA



La segunda edición de la **Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA** ha sido elaborada por el Departamento de Estudios y Desarrollo con la colaboración de los demás departamentos de la División de Evaluación Ambiental y Participación Ciudadana, División Jurídica, Departamento de Comunicaciones y Direcciones Regionales del Servicio de Evaluación Ambiental.

Agradecemos al Ministerio del Medio Ambiente y a la Dirección Meteorológica de Chile, de la Dirección General de Aeronáutica Civil, por sus aportes y revisiones que hicieron posible esta publicación.

Finalmente, cabe mencionar que las bases teóricas de esta segunda edición tienen su origen en el estudio técnico que en su momento elaboró la consultora Fundación para la Transferencia Tecnológica (Untec).

PRESENTACIÓN

Dando cumplimiento a su mandato legal¹, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) se encuentra, permanentemente, uniformando criterios, requisitos, condiciones, antecedentes y exigencias técnicas de la evaluación de impacto ambiental de proyectos y actividades, entre otros, mediante la elaboración de guías.

Dicha labor requiere establecer criterios comunes y consistentes con el conjunto de competencias ambientales que tienen los distintos Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (Oaeca) que participan en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), contribuyendo, de esta manera, con la disminución de los márgenes de discrecionalidad en la toma de decisiones y la tecnificación de dicho sistema, como también, entregando certezas jurídicas y técnicas a quienes participan de este proceso.

Sobre la base de lo anterior, la elaboración de esta segunda edición de la Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA responde a la necesidad de **revisar los modelos recomendados para representar la dispersión de la calidad del aire y actualizar las precisiones en la solicitud y análisis de datos** considerados para estos simuladores, de acuerdo con los avances técnicos y tecnológicos. De esta revisión y actualización se destacan y precisan los principales lineamientos y criterios:

- Los modelos recomendados en la primera edición siguen siendo válidos, generando mayores precisiones para su utilización (véase numeral 3.2).
- Se solicita a los titulares precisiones en los datos de entrada de los modelos de calidad del aire, específicamente en los meteorológicos (véase numeral 4.3).
- Se aborda la configuración del modelo meteorológico (véase numeral 4.3), donde ya no se recomienda una configuración estática, como en la primera edición, sino una configuración que represente de la manera más eficaz posible los fenómenos meteorológicos (véase numeral 4.5).
- Se establecen precisiones en la configuración de los receptores de impactos en el modelo de calidad del aire, entregando mayor detalle que la edición anterior (véase numeral 4.5.2).

¹ Ref. artículo 81, letra d), de la Ley N°19.300.

- Se solicita a los titulares presentar los archivos mínimos de modelación, según lo señalado en el Anexo III de esta Guía, considerando que aquello puede constituir una información esencial para el proceso de evaluación de impacto ambiental (véase numeral 5.3).
- Se solicita a los titulares que la presentación y análisis de los resultados de la modelación considere el efecto acumulativo dentro del área de influencia (véase numeral 5.9).
- Se solicita a los titulares precisión en la elección de la estación meteorológica y los resultados esperados en el análisis cuantitativo de la incertidumbre del modelo meteorológico (véase numeral 6).
- Se establece la vinculación con los criterios de representatividad de las estaciones de calidad del aire para la adecuada descripción y definición del área de influencia (véase numeral 8).

A su vez, esta segunda edición es parte de los compromisos adquiridos por el SEA con la Contraloría General de la República, según lo solicitado en el Informe Final N°27/2022 respecto al caso de contaminación que afecta a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, en cuanto a la necesidad detectada de incorporar lineamientos respecto a los efectos acumulativos de las emisiones atmosféricas.

Cabe señalar que las restantes temáticas de la Guía se mantienen en concordancia con la primera edición del año 2012, incluido el objetivo que corresponde a entregar criterios técnicos para el uso de modelos de calidad del aire en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

**Dirección Ejecutiva
Servicio de Evaluación Ambiental**

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A continuación, se listan las principales siglas y acrónimos que se utilizan en este documento:

- AI** : Área(s) de Influencia
- CLA** : Capa Límite Atmosférica
- DIA** : Declaración(es) de Impacto Ambiental
- ECC** : Efectos, Características o Circunstancias
- EIA** : Estudio(s) de Impacto Ambiental
- MP** : Material Particulado
- Oeca** : Órgano(s) de la Administración del Estado con Competencia Ambiental
- PAS** : Permisos Ambiental(es) Sectorial(es)
- PMI** : Punto de Máximo Impacto
- RCA** : Resolución(es) de Calificación Ambiental
- SEA** : Servicio de Evaluación Ambiental
- SEIA** : Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| PRESENTACIÓN..... | 5 |
| SIGLAS Y ACRÓNIMOS..... | 7 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1 Alcances generales de la evaluación de impacto ambiental | 14 |
| 1.2 Objetivos y alcance de la Guía | 16 |
| 2. TIPOS DE MODELOS EXISTENTES | 20 |
| 2.1 Modelos Gaussianos | 20 |
| 2.2 Modelos Eulerianos | 20 |
| 2.3 Modelos Lagrangeanos | 21 |
| 2.4 Modelos tipo <i>puff</i> | 21 |
| 3. MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE RECOMENDADOS PARA SU USO EN EL TERRITORIO NACIONAL | 24 |
| 3.1 Criterios generales | 24 |
| 3.2 Modelos recomendados | 25 |
| 4. DATOS DE ENTRADA | 30 |
| 4.1 Fuentes de emisión | 30 |
| 4.2 Dominio de modelación | 32 |
| 4.3 Datos meteorológicos | 33 |
| 4.3.1 Fuente y calidad de datos meteorológicos disponibles | 33 |
| 4.3.2 Período modelado | 34 |
| 4.3.3 Resolución horizontal de la grilla de modelación meteorológica | 35 |
| 4.3.4 Modelo de calidad del aire y datos meteorológicos | 35 |
| 4.4 Datos topográficos y de uso de suelos | 37 |
| 4.5 Configuración de los modelos | 37 |
| 4.5.1 Parametrización modelo meteorológico | 37 |
| 4.5.2 Parametrización modelo de calidad del aire | 38 |

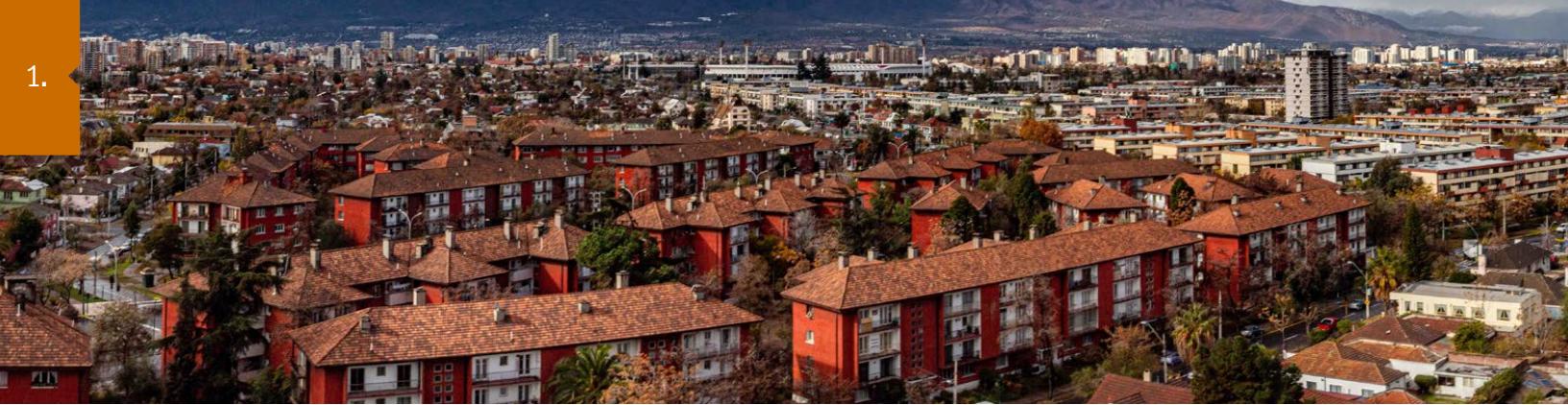
| | |
|---|-----------|
| 5. PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS | 42 |
| 5.1 Descripción y justificación del modelo | 42 |
| 5.2 Caracterización meteorológica | 43 |
| 5.3 Bases de datos y archivos de modelación | 43 |
| 5.4 Características del dominio de modelación y su entorno | 43 |
| 5.5 Fuentes de emisión | 45 |
| 5.6 Presentación de datos meteorológicos y de calidad del aire observados | 46 |
| 5.6.1 Datos de calidad del aire | 46 |
| 5.6.2 Datos meteorológicos | 46 |
| 5.6.3 Presentación de datos | 47 |
| 5.7 Presentación de los resultados de la modelación meteorológica | 52 |
| 5.8 Análisis de los datos meteorológicos | 55 |
| 5.9 Presentación de los resultados de la modelación de calidad del aire | 56 |
| 5.9.1 Cantidad de cifras de los resultados de la modelación de calidad del aire | 60 |
| 6. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE | 62 |
| 6.1 Datos meteorológicos observados | 64 |
| 6.2 Análisis de validez de los datos | 66 |
| 6.2.1 Análisis cualitativo | 66 |
| 6.2.2 Análisis cuantitativo | 67 |
| 7. CONCLUSIONES DEL INFORME DE MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE | 70 |
| 8. OTRAS CONSIDERACIONES..... | 72 |
| 8.1 Caracterización de la calidad del aire | 72 |
| 8.1.1 Representatividad de las mediciones de calidad del aire | 73 |
| 8.1.2 Periodo de mediciones de calidad del aire | 74 |

| | |
|--|------------|
| ANEXO I. FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA | 76 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 77 |
| 1.1 Estructura vertical de la atmósfera | 77 |
| 1.2 Escalas de variabilidad | 79 |
| 1.3 Factores meteorológicos básicos de la contaminación atmosférica | 82 |
| 2. FACTOR ENERGÉTICO..... | 83 |
| 2.1 Transferencia radiativa | 83 |
| 2.2 Balance de energía superficial | 86 |
| 3. FACTOR DE TRANSPORTE..... | 90 |
| 3.1 Conceptos básicos | 90 |
| 3.2 Rasgos de la circulación general y de escala sinóptica | 91 |
| 3.3 Circulaciones subsinópticas y de mesoescala | 92 |
| 3.3.1 Bajas costeras | 92 |
| 3.3.2 Brisas de valle/montaña | 92 |
| 3.3.3 Brisas de mar/tierra | 92 |
| 4. FACTOR DE DISPERSIÓN..... | 93 |
| 4.1 Turbulencia atmosférica | 93 |
| 4.2 Factor mecánico de la turbulencia | 94 |
| 4.3 Factor de estabilidad de la turbulencia | 94 |
| 4.4 Influencia de la superficie | 96 |
| 5. CICLO DIARIO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA O CAPA DE MEZCLA..... | 96 |
| 5.1 Capa límite diurna | 97 |
| 5.2 Capa límite nocturna | 99 |
| 5.3 Transiciones | 100 |
| 5.3.1 Transición matinal | 100 |
| 5.3.2 Transición vespertina | 100 |
| 5.4 Variaciones | 100 |
| 6. MEDICIONES METEOROLÓGICAS PARA CALIDAD DEL AIRE | 101 |
| 6.1 Características especiales | 101 |
| 6.2 Parámetros meteorológicos básicos | 102 |
| 6.3 Mediciones de turbulencia | 102 |
| 6.4 Balance de energía superficial | 103 |
| 6.5 Perfiles verticales | 103 |

| | |
|---|------------|
| 7. EJEMPLOS | 104 |
| 7.1 Santiago (fuentes superficiales) | 104 |
| 7.1.1 Topografía y meteorología | 104 |
| 7.1.2 Concentraciones | 111 |
| 7.2 Valle de Copiapó (fuente de altura) | 112 |
| 8. QUÍMICA ATMOSFÉRICA | 116 |
| 8.1 Gases en la atmósfera | 116 |
| 8.1.1 Gases inorgánicos | 116 |
| 8.1.2 Compuestos orgánicos volátiles | 118 |
| 8.2 Reacciones químicas | 120 |
| 8.3 Cinética química | 121 |
| 8.4 Fotoquímica de la tropósfera | 122 |
| 8.5 Material particulado | 129 |
| 8.5.1 Distribución por tamaños | 129 |
| 8.5.2 Procesos fisicoquímicos | 131 |
| 8.5.3 Composición química del material particulado | 132 |
| 9. PROCESOS DE DEPOSICIÓN | 134 |
| 10. MODELOS | 135 |
| 10.1 Modelos Gaussianos | 135 |
| 10.2 Modelos Eulerianos | 136 |
| 10.3 Modelos Lagrangeanos | 138 |
| 10.4 Modelos Tipo <i>Puff</i> | 138 |
| ANEXO II. APLICACIÓN DE MODELOS FOTOQUÍMICOS | 139 |
| a) Inventario de emisiones | 139 |
| b) Condición de borde | 140 |
| c) Simulación base y de proyecto | 142 |
| d) Período de simulación | 142 |
| ANEXO III. ARCHIVOS DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS MODELOS | 143 |
| ANEXO IV. SOLICITUD DE INFORMACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE TASAS DE EMISIÓN EN CONSIDERACIÓN A BALANCES DE MATERIA O MASA | 145 |
| ANEXO V. BIBLIOGRAFÍA | 147 |

1.

INTRODUCCIÓN



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Alcances generales de la evaluación de impacto ambiental

La evaluación de impacto ambiental es el procedimiento orientado a determinar si el impacto ambiental de un proyecto o actividad se ajusta a las normas vigentes². Como tal, contempla mecanismos a través de los cuales se determina el referido impacto y su significancia, así como el cumplimiento de las normas ambientales aplicables. La Ley N°19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, establece que dicho procedimiento está a cargo del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA).

En términos generales, la evaluación de impacto ambiental en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) se basa en el análisis de las partes, obras y acciones de un proyecto o actividad a ejecutarse o modificarse y cómo estas alteran los componentes del medio ambiente receptores de impactos que son considerados objetos de protección³ para el SEIA. Tal ejercicio se realiza previo a la ejecución del proyecto o actividad y, por lo tanto, se basa en una predicción de la evolución de los componentes ambientales en los escenarios con y sin proyecto.

El titular de un proyecto o actividad debe analizar si este se encuentra en el listado de tipologías susceptibles de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases, que deben someterse al SEIA, listado contenido en el artículo 10 de la Ley N°19.300 y el artículo 3º del Reglamento del SEIA⁴.

² Ref. artículo 2º, letra j), de la Ley N°19.300.

³ Más antecedentes en el documento “Criterio de Evaluación en el SEIA: Objetos de protección”, disponible en el Centro de Documentación del SEA en su sitio web, www.sea.gob.cl.

⁴ Decreto Supremo N°40, de 2012, del Ministerio del Medio Ambiente que aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Es responsabilidad del titular definir la modalidad de ingreso, ya sea a través de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Para ello, corresponde un análisis exhaustivo del artículo 11 de la Ley N°19.300, donde se establece que los proyectos que se someten al SEIA requieren la elaboración de una EIA si generan o presentan a lo menos uno de los siguientes Efectos, Características o Circunstancias (ECC):

- a) Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones o residuos.
- b) Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire.
- c) Reasentamiento de comunidad humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos.
- d) Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares y áreas con valor para la observación astronómica con fines de investigación científica, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
- e) Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
- f) Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

De acuerdo con lo anterior, la generación o presencia de al menos uno de estos ECC hace necesario que el titular del proyecto o actividad elabore un EIA, el cual debe considerar las materias contenidas en el artículo 12 de la Ley N°19.300 y los artículos 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 18 del Reglamento del SEIA.

Por el contrario, de acuerdo con el artículo 18 de la Ley N°19.300, si el proyecto o actividad no genera ninguno de los ECC antes señalados, se debe presentar una DIA, la que debe considerar las materias contenidas en el artículo 12 bis de la Ley N°19.300 y los artículos 12, 13, 14, 15, 16, 17 y 19 del Reglamento del SEIA.

En consecuencia, la evaluación de impacto ambiental es el procedimiento administrativo en que, a través de un EIA o una DIA, debe demostrarse que el proyecto o actividad cumple con las normas ambientales aplicables. Además, en el caso de un EIA se debe acreditar que el proyecto o actividad se hace cargo de los ECC que genera o presenta, mediante la definición e implementación de medidas, y justificar la inexistencia de los demás ECC enunciados en el artículo 11 de la Ley N°19.300. En el caso de una DIA, además se debe justificar la inexistencia de impactos ambientales significativos.

La autoridad, por su parte, debe verificar y certificar el cumplimiento de la normativa ambiental aplicable, incluido los requisitos de carácter ambiental contenidos en los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS) y calificar la pertinencia, efectividad e idoneidad de las medidas ambientales propuestas.

1.2 Objetivos y alcance de la Guía

1.

Cuando un proyecto sometido al SEIA emite contaminantes o precursores de contaminantes a la atmósfera, frecuentemente se utilizan herramientas de modelación de la calidad del aire como método para estimar concentraciones de contaminantes atmosféricos y evaluar el impacto sobre la calidad del aire, a partir de las emisiones de contaminantes asociados a las distintas fases (construcción, operación y cierre) de los proyectos sometidos a evaluación. Lo anterior permite estimar el consecuente impacto sobre otros objetos de protección, como otros recursos naturales renovables y la salud de la población.

En este sentido, el objetivo de esta Guía es actualizar los criterios técnicos para el uso de modelos de calidad del aire en el SEIA, estableciendo un listado de recomendaciones de buenas prácticas en el contexto nacional, con el objetivo de asegurar la entrega de criterios claros y la información mínima necesaria para desarrollar la evaluación.

La Figura 1 ilustra el proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto y el alcance de la presente Guía dentro de dicho proceso, cuyas etapas se describen a continuación.

Figura 1. Contenidos y alcances de esta Guía respecto de la evaluación ambiental



Fuente: elaboración propia

La identificación de las fuentes de emisión de un proyecto y la cuantificación de sus emisiones forman parte de la **descripción del proyecto**, tanto en una DIA como en un EIA.

1.

A partir de dicha descripción, es posible la **identificación de impactos** potenciales. Por ejemplo, si el proyecto emite Material Particulado (MP), un impacto del proyecto sería el “aumento de las concentraciones ambientales de MP” lo que, a su vez, y dependiendo de la caracterización de las áreas de influencia, podría ocasionar impactos sobre la salud de la población y recursos naturales.

De acuerdo con lo presentado en la Figura 1, para establecer si los impactos identificados son o no significativos, se requiere realizar primero una **estimación del impacto**. A la identificación y estimación de impactos se le denomina **predicción de impactos**, siendo esta etapa del proceso en la cual se centra la presente Guía al abordar la estimación, del impacto de las emisiones a la atmósfera sobre la calidad del aire, a través del uso de las herramientas de modelación.

Esta Guía reconoce la existencia de limitaciones e incertidumbres asociadas a cada tipo de modelo y a los datos utilizados como información de entrada en estos. En este sentido, se busca incorporar en el análisis las posibles fuentes de incertidumbre para que sean analizadas al momento de evaluar los resultados de la modelación y en la toma de decisiones, en consideración al mejor desempeño.

Por otro lado, esta Guía no aborda aspectos teóricos de modelación ni descripción exhaustiva de los modelos existentes, materias sobre las cuales existe abundante información disponible. Tampoco tiene como objeto establecer metodologías sobre estimación de emisiones, evaluación del riesgo para la salud de la población o evaluación de efectos adversos sobre los recursos naturales.

Además, esta Guía se debe entenderse como complementaria a otros documentos técnicos, tanto metodológicos como de criterios, ya publicados o que se publiquen en el futuro por el SEA, disponibles en el Centro de Documentación del sitio web del Servicio, www.sea.gob.cl.

Por último, y para efectos de una mejora continua, esta Guía puede ser objeto de revisión y actualización, considerando la velocidad de los avances en los ámbitos de las ciencias atmosféricas aplicadas, desarrollo de las herramientas de modelación de calidad del aire e información ambiental disponible a la fecha de actualización, de modo que configure un aporte a la eficiencia y eficacia del proceso de evaluación ambiental.

De acuerdo con lo dispuesto en la Ley N°19.300, el Reglamento del SEIA y el Ordinario de la Dirección Ejecutiva del SEA N°151.276, del 2015; en los procesos de evaluación ambiental se debe observar el contenido de esta Guía, siendo responsabilidad de los titulares de los proyectos o actividades entregar toda la información necesaria, con la que se permita delimitar un desempeño idóneo del modelo de calidad del aire utilizado, según las características propias del proyecto o actividad, de su lugar de emplazamiento y del área de influencia respectiva.



2. TIPOS DE MODELOS EXISTENTES



2. TIPOS DE MODELOS EXISTENTES

Los modelos de calidad del aire existentes se pueden clasificar principalmente en Gaussianos, Eulerianos, Lagrangeanos y tipo *puff*, cuyas características se describen a continuación. En el numeral 10 del Anexo I de esta Guía se presenta una descripción más detallada de estos modelos.

Cabe señalar que existe una serie de modelos denominados *screening* que se utilizan con el objeto de determinar la necesidad de usar un modelo de calidad del aire refinado. Sin embargo, su uso para la evaluación de los impactos está restringida y puede ser utilizada bajo ciertas condiciones cuyo detalle no es parte de la presente Guía, por lo que no se entregan recomendaciones para su uso.

2.1 Modelos Gaussianos

Los modelos Gaussianos describen la distribución tridimensional de una pluma bajo condiciones meteorológicas y de emisiones estacionarias. Las concentraciones se estiman en base a una distribución Gaussiana cuyos parámetros dependen de las condiciones meteorológicas. Aunque existen modelos Gaussianos que incluyen algún algoritmo para considerar terreno complejo, sus conceptos matemáticos son fundamentalmente iguales a aquellos modelos que no lo hacen.

Ejemplo de modelo Gaussiano: AERMOD.

2.2 Modelos Eulerianos

Los modelos Eulerianos tienen por objetivo tratar todos los procesos atmosféricos relacionados a la dispersión de contaminantes y su transformación química. Con este fin, estos modelos traducen las leyes físicas y químicas relevantes a ecuaciones matemáticas que son en su gran mayoría de tipo diferencial. Otra característica de estos modelos es que discretizan el espacio en forma de una grilla (o malla) tridimensional definida por puntos con un determinado espaciamiento horizontal y vertical, el que se denomina resolución espacial de la grilla. El

modelo integra las ecuaciones matemáticas en el tiempo en cada uno de los puntos de la grilla, generándose la información de la evolución temporal de las concentraciones en las tres dimensiones de la grilla. Existen distintos grados de complejidad en los modelos Eulerianos en términos de la representación de procesos, desde modelos que consideran sólo la dispersión hasta modelos que incluyen todos los procesos fotoquímicos y de aerosoles.

Ejemplos de modelo Euleriano: WRF-Chem, CAMx y CMAQ.

2.

2.3 Modelos Lagrangeanos

El concepto detrás de un modelo Lagrangeano es seguir matemáticamente el movimiento de una parcela de aire o de una partícula en la atmósfera. Es decir, si en la posición inicial de una partícula se conoce tanto la velocidad como la dirección del viento, se puede calcular a dónde se desplaza esa partícula en un intervalo de tiempo finito dado (integración en el tiempo). Después de esa integración, la partícula tiene una posición nueva en el espacio, donde el viento puede ser distinto que en la posición inicial. Ocupando esta información del viento, nuevamente se puede integrar en el tiempo moviendo la partícula a otra posición y así sucesivamente. El camino que se describe a través de esta integración se llama trayectoria. Con el fin de obtener una estimación de las concentraciones en un modelo de trayectorias, se requiere el cálculo de muchas trayectorias, del orden de un millón para la dispersión de un contaminante desde una fuente. Además de los procesos de transporte por advección (transporte por viento), también se pueden incorporar los procesos turbulentos de la atmósfera.

Los modelos Lagrangeanos tienen una capacidad más limitada que los modelos Eulerianos de incorporar procesos químicos. No hay mucha experiencia en el uso de modelos Lagrangeanos en Chile y a nivel internacional se usan en muy pocos países con fines regulatorios (por ejemplo, Alemania). Aunque no se ha descartado su uso futuro en Chile, en la actualidad no existen antecedentes suficientes para recomendar este tipo de modelos.

Ejemplo de modelo Lagrangeano: AUSTAL

2.4 Modelos tipo *puff*

Los modelos tipo *puff* son una combinación entre los modelos Gaussianos y los modelos Lagrangeanos, en el sentido de que esencialmente calculan la dispersión de contaminantes provenientes de una emisión instantánea, llamada *puff*, a lo largo de una trayectoria. Su aproximación matemática consiste en estimar la dispersión en forma Gaussiana en cada punto de una trayectoria; es decir, a diferencia de los modelos Lagrangeanos que necesitan el cálculo de un gran número de trayectorias para una fuente, los modelos tipo *puff* solo requieren una trayectoria por *puff*, lo que hace su cálculo mucho más rápido. En el caso de emisiones continuas, se simulan las trayectorias y la dispersión Gaussiana de muchos *puffs*.

Ejemplo de modelo tipo *puff*: CALPUFF.



3. MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE RECOMENDADOS PARA SU USO EN EL TERRITORIO NACIONAL



3.

3. MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE RECOMENDADOS PARA SU USO EN EL TERRITORIO NACIONAL

3.1 Criterios generales

Cualquier modelo que se ocupe para los fines que persigue el SEIA debe cumplir con las siguientes características:

- Disponer de documentación completa que describa sus fundamentos conceptuales, ecuaciones matemáticas, y los tipos de datos de entrada y de salida junto con sus respectivos formatos.
- Estar escrito en un lenguaje de programación común y con código abierto.
- Disponer de documentación sobre su evaluación, en forma de informes técnicos, publicaciones científicas o equivalente a nivel nacional.
- Contar con desarrollo y soporte técnico actualizado de parte de la comunidad usuaria o desarrolladores.

Los modelos recomendados en esta Guía cumplen con los requisitos señalados. En el caso de utilizarse en el SEIA un modelo distinto a los recomendados, se debe acompañar la documentación que acredite que el modelo cumple con los criterios indicados.

3.2 Modelos recomendados

Al momento de seleccionar un modelo de calidad del aire se deben considerar los siguientes criterios: **tipo de terreno** (homogéneo o heterogéneo) y el **tipo de contaminante** (primarios o secundarios).

El tipo de terreno es importante por el impacto que tiene en las condiciones meteorológicas locales⁵. Estas condiciones están vinculadas a las características topográficas del dominio a modelar, es decir, orografía, uso de suelo, rugosidad superficial, presencia de cuerpos de agua, vegetación, zonas residenciales, costeras, entre otras.

En términos simples, se puede señalar que mientras más heterogéneas son las características topográficas del área de interés, más complejo es el terreno y, en consecuencia, más heterogénea es la meteorología, tanto horizontal como vertical, en una variabilidad tanto de mesoescala como microescala o escala local.

A diferencia de otros países, que en variadas zonas, pueden ser representados como terrenos con características homogéneas, las características de gran parte del territorio nacional se deben considerar como complejas o heterogéneas, lo que –a partir de una cierta escala– induce a una meteorología espacial y temporalmente heterogénea⁶. Por esta razón, se deben considerar modelos capaces de representar esta heterogeneidad de la mejor manera posible.

Para el **primer criterio** se debe tener en consideración que, entre menor distancia (a lo largo del territorio nacional) existen mayores probabilidades de considerar el terreno como homogéneo, ya que debiesen encontrarse menos factores que alteren, significativamente, el transporte y dilución de contaminantes⁷. Para efectos del análisis del modelo a escoger, este primer criterio considerará una distancia lineal referencial de 5 km desde la fuente de emisión hasta la zona de impactos de las emisiones atmosféricas.

El **segundo criterio** para la selección de un modelo es el tipo de contaminante a modelar: si los contaminantes son directamente emitidos a la atmósfera (contaminantes primarios) o si son productos de reacciones fisicoquímicas en la atmósfera (contaminantes secundarios).

Existen variados modelos a nivel internacional que cumplen con los requerimientos específicos para el territorio nacional. No obstante, el criterio adicional a los mencionados en el numeral 3.1 de esta Guía, ha sido que debe existir cierta experiencia a nivel nacional sobre

⁵ Para más detalle véase desde el numeral 2 al 5 del Anexo I de la presente Guía.

⁶ En base al Informe Técnico elaborado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y el Informe Técnico elaborado por la Fundación para la Transferencia Tecnológica (Untec), ambos para el SEA del año 2011.

⁷ El informe técnico de Untec plantea que “*bajo la hipótesis que en un terreno complejo la representatividad de la información de una estación meteorológica disminuye en función a la distancia de esta*”, es claro que la aplicabilidad de un modelo, en primer lugar, se deba analizar bajo los alcances de los impactos del proyecto, por ende, su zona de modelación. En el marco del SEIA, se considerará un rango de 5 km para la toma de decisiones en cuanto al modelo recomendado, siempre en vista de las consideraciones del informe técnico indicado.

el desempeño del modelo, ya sea en consultorías, uso con fines académicos o por parte de la autoridad competente.

En base a las consideraciones anteriores, se presentan los siguientes tres casos para la selección de un modelo de calidad del aire, tomando como referencia una distancia de 5 km.

a) Contaminantes primarios – alcance de los impactos de las emisiones en un rango menor o igual a 5 km

Para esta extensión es aceptable tanto la utilización de un modelo Gaussiano como un modelo tipo *puff*. **Sin embargo, el uso de un modelo Gaussiano debe ser analizado bajo las siguientes condiciones.**

En primer lugar, se debe revisar la existencia de una(s) estación(es) meteorológica(s) dentro de los 5 km en donde tengan alcance los impactos de las emisiones, de manera de asegurar la homogeneidad de la meteorología en el terreno que esta representa. Por otro lado, se debe analizar si existen factores⁸ que puedan perturbar el carácter lineal u homogéneo de la meteorología –reducida para efectos de análisis a de los campos de vientos– dentro de esta extensión (5 km). Si se presenta algún factor que afecte la homogeneidad, se debe considerar el uso de un modelo recomendado en el numeral 3.2. letra b) de esta Guía.

Cualquier otra forma de demostrar la homogeneidad de la meteorología será considerada, siempre y cuando, sea justificada técnicamente acorde a las directrices anteriores. Lo anterior, incluye el caso que no se encuentren estaciones meteorológicas en esta zona o, como bien se indicó, si se presentan los factores antes mencionados, se debe considerar el uso de un modelo recomendado en el numeral 3.2. letra b) de esta Guía.

Por último, la magnitud de las emisiones también es un factor para considerar al momento de escoger un modelo Gaussiano, por lo que en el caso de mega fuentes (emisiones de magnitud considerable) debe usarse algún modelo recomendado en el numeral 3.2. letra b), con las salvedades allí presentadas.

En resumen, los modelos recomendados son CALPUFF (tipo *puff*) y AERMOD (tipo Gaussiano); para este último se deben analizar los puntos anteriormente indicados.

⁸ Dentro de los factores posibles se encuentran variaciones de pendiente significativa, cuerpos de aguas considerables, montañas y cerros, cambios abruptos en el uso de suelo, fumigaciones costeras, entre otros.

b) Contaminantes primarios – alcance de los impactos de las emisiones en un rango mayor a los 5 km

En el caso que los impactos de las emisiones abarquen un rango mayor a los 5 km desde la(s) fuente(s) de emisión, lo más adecuado es utilizar un modelo que permita simular la meteorología heterogénea. Los modelos capaces de esta representación son los del tipo *puff* y Eulerianos.

Los modelos Eulerianos recomendados corresponden a WRF-Chem, CAMx y CMAQ, mientras que el modelo tipo *puff* recomendado es CALPUFF⁹.

c) Contaminantes secundarios

La modelación de contaminantes como ozono y MP2,5 secundario requiere la aplicación de modelos fotoquímicos. Estos modelos demandan un alto grado de experticia por parte del usuario(a) y computación de alto desempeño, por lo que la necesidad de su implementación debe analizarse caso a caso, considerando la magnitud del proyecto y sus impactos ambientales potenciales, específicamente los relacionados al aporte de compuestos que puedan generar estos contaminantes secundarios.

Los modelos fotoquímicos que cumplen los criterios generales del numeral 3.1 de esta Guía y que, además, han sido probados con buenos resultados en Chile son WRF-Chem, CAMx y CMAQ, por lo que se recomienda su uso en el SEIA.

La modelación de contaminantes secundarios se diferencia de la modelación de contaminantes primarios en términos de: a) uso de inventarios de emisiones; b) condición de borde química del modelo; c) simulación de situación base y con proyecto; y d) periodo de simulación. La descripción de cada uno de estos se presenta en detalle en el Anexo II de esta Guía.

El modelo CALPUFF también puede ser usado para modelar contaminantes secundarios¹⁰ sin embargo, su uso, en reemplazo de un modelo fotoquímico, estará limitado al aporte de fracción secundaria del Material Particulado en relación con las emisiones de gases precursores. Lo anterior, debe ser justificado técnicamente en cada caso. Esta indicación solo está enmarcada en la modelación de material particulado secundario, no debe ser empleado para modelar otros contaminantes secundarios como ozono troposférico.

9 Se debe tener presente que, el modelo CALPUFF tiene dificultades para modelar impactos más allá de los 50 km, por lo que, su uso en estos casos debe ser justificado técnicamente. Ref: Federal Register. 2017.

10 El modelo CALPUFF contiene dos procesadores fotoquímicos incorporados; el modelo químico MESOPUFF II y RIVAD/ARM3. Ambos procesadores convierten los dióxidos de azufre en sulfatos y los óxidos de nitrógeno en nitratos, ambos aerosoles, a partir de diversos parámetros, entre ellos, la cantidad de energía aportada por la luz del sol. Su utilización, en caso de usar CALPUFF para modelar contaminantes secundarios, específicamente la fracción secundaria del material particulado debe ser justificada técnicamente. No debe ser empleado para modelar otros contaminantes secundarios como ozono troposférico.

3.



4.

DATOS DE ENTRADA



4.

4. DATOS DE ENTRADA

4.1 Fuentes de emisión¹¹

Se deben identificar y estimar las emisiones de todos los contaminantes relevantes, con especial énfasis en aquellos que están normados o se encuentran regulados por instrumentos de gestión ambiental como: Normas de Calidad Ambiental, Normas de Emisión, Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica, los señalados en la normativa nacional ambiental aplicable y, además, los estipulados en normas de calidad de los Estados de referencia que señala el Reglamento del SEIA que sean de interés en la evaluación de impactos¹². En el caso de contaminantes secundarios, también se deben considerar sus precursores.

Debe ponerse especial atención a las tasas de emisión que se utilizarán para el modelo de calidad del aire. En una modelación que use las tasas de emisión horarias, lo adecuado es que correspondan a las tasas máximas y, por tanto, no pueden obtenerse directamente a partir de emisiones diarias o anuales sin considerar las horas reales de operación de la fuente¹³.

Se debe evitar el uso de emisiones horarias promedio que no representan la situación más desfavorable para la evaluación.

¹¹ Esta información debe presentarse en el capítulo de Descripción del Proyecto del EIA o DIA, y debe ser consistente y coincidir con lo presentado en la documentación de modelación.

¹² En el Centro de Documentación del SEA se encuentra una recopilación de normas de referencias a nivel internacional para evaluar el riesgo para la salud y efectos adversos sobre recursos naturales renovables.

¹³ Por ejemplo, si para modelar se distribuyen homogéneamente en 24 horas la emisión diaria (kg/día) de una fuente que opera solo 6 horas al día, que coincide con las horas de condiciones meteorológicas más desfavorables para la dispersión, el modelo subestimaría el impacto.

Por lo tanto, las tasas de emisión deben ser presentadas con el mayor detalle posible, es decir, señalar toda la matemática¹⁴, indicaciones y supuestos de la transformación de las emisiones (por ejemplo: ton/año, kg/año, según corresponda) a las tasas necesarias para el modelo de calidad del aire (por ejemplo; g/s, ton/hora, según corresponda), especificando:

- Fase del proyecto o actividad: construcción, operación y cierre, que sea pertinente evaluar.
- Nivel de actividad (horas de funcionamiento al día, semana, mes y año de análisis, según corresponda).
- Frecuencia de emisión¹⁵.
- Todo supuesto utilizado debe estar basado en el escenario más desfavorable¹⁶.
- Respecto a las fuentes puntuales, es necesario agregar que, además, se debe informar: cantidad de fuentes (chimeneas), diámetro del ducto (cm, m, según corresponda), velocidad y temperatura de salida de los gases, altura de la chimenea, entre otras. Toda esta información debe ser coherente con la descripción del proyecto.
- Se debe exponer de manera clara la codificación de la fuente de emisión al momento de ingresarla al modelo de calidad del aire, es decir, que cada código sea claro en indicar a qué tipo de fuente de emisión del proyecto corresponde.

Las tasas de emisión pueden ser obtenidas desde emisiones de referencia o mediciones en la fuente, modelos empíricos, factores de emisión o, balances de materia o masa, para lo cual, y en función a las características del proyecto, se deben priorizar la obtención de las tasas con una menor incertidumbre posible, siendo esta alternativa las emisiones de referencia o mediciones en la fuente. En el caso de utilizar factores de emisión para la estimación, estos deben corresponder a la última actualización disponible¹⁷.

Las fuentes móviles “fuera de ruta” que posean un área de operación limitada pueden modelarse como fuentes de área, volumétricas o lineales, dependiendo de sus características, lo que debe ser justificado técnicamente. Mientras que para las fuentes móviles “en ruta” se debe analizar y justificar la capacidad del modelo, en función a las actualizaciones disponibles, en caso de simular este tipo de fuentes.

¹⁴ Las memorias de cálculo de las tasas de emisión deben ser presentadas en formato Excel (xlsx.), detallando tanto las tasas como la metodología de estimación de estas.

¹⁵ Indicar el número de veces que se repite la emisión en un determinado tiempo, por ejemplo, “2 veces por día”, “3 veces por semana”, “7 veces al mes”, etc.

¹⁶ La Letra f) del artículo 18º del Reglamento del SEIA indica que, “*la predicción y evaluación de los impactos ambientales se efectuará considerando el estado de los elementos del medio ambiente y la ejecución del proyecto o actividad en su condición más desfavorable*” (énfasis agregado).

¹⁷ En el Centro de Documentación del SEA se encuentra una recopilación de factores de emisión. De todas maneras, deben ser revisadas desde la fuente original para validar su última versión. Por ejemplo, en el caso de usarse factores del AP-42, su versión actualizada se encuentra en el sitio web: <http://www.epa.gov>

La evaluación ambiental debe enfocarse en los impactos relevantes de cada proyecto o actividad. En este sentido, la necesidad de realizar una modelación refinada de la calidad del aire debe responder a la posibilidad de que el proyecto genere un impacto de relevancia sobre la calidad del aire¹⁸, la salud de la población o sobre cualquier otro objeto de protección. Lo anterior debe ser analizado caso a caso considerando la magnitud y duración de las emisiones, la presencia dentro del área de influencia de otros objetos de protección, entre otros aspectos, especialmente cuando se trata de actividades temporales con impactos ambientales acotados.

4.2 Dominio de modelación

La extensión del área de modelación o dominio espacial se define en función de la magnitud y extensión de las emisiones de contaminantes¹⁹ del proyecto, así como la presencia de receptores susceptibles de ser afectados²⁰. Dicho dominio puede requerir ser ajustado en función de los resultados de una modelación preliminar, por ejemplo, para encontrar el Punto de Máximo Impacto (PMI) fuera del dominio escogido. Lo anterior debe realizarse previo al ingreso del proyecto al SEIA.

El dominio elegido²¹ debe contener las áreas de influencia de los distintos objetos de protección que puedan verse afectados por las emisiones del proyecto, cuyos impactos son estimados y evaluados con los resultados del modelo de calidad del aire como antecedente fundante.

El dominio de modelación siempre debe ser mayor o igual, en extensión, al área de influencia de la calidad del aire. Al igual que el área de influencia, el dominio puede sufrir un proceso iterativo hasta llegar a delimitar uno definitivo²², el cual debe ser realizado de manera previa al ingreso del proyecto al SEIA por parte del titular.

¹⁸ No confundir impactos de relevancia sobre la calidad del aire con impactos significativos o impactos no significativos. Cuando esta Guía indica impactos de relevancia se refiere a aquellos impactos en la calidad del aire que deben ser previstos y evaluados en función de las características de cada proyecto, para determinar, luego, en base a los lineamientos del artículo 11 de la Ley N°19.300, si corresponde a impactos significativos o no significativos.

¹⁹ Las escalas espaciotemporales de los contaminantes atmosféricos dependerán de sus propiedades. Por ejemplo, los aerosoles son considerados como especies de vida moderadamente larga, con tiempos de residencia en la atmósfera de días hasta de un año, y un alcance espacial desde 1 a 100 km (Adaptado de Brasserur *et al*, 1999).

²⁰ Estos receptores susceptibles corresponden a los objetos de protección en el marco del SEIA, descritos en el documento "Criterio de Evaluación en el SEIA: Objetos de Protección", del 2022.

²¹ En el numeral 6.1 de la presente Guía se indican las condiciones de la estación meteorológica dentro del dominio. En tanto, la "Guía Calidad del Aire en el Área de Influencia de Proyectos que ingresan al SEIA", del 2015, presenta los lineamientos de la línea de base de calidad del aire, cuya(s) estación(es) deben estar contenidas en este dominio.

²² Se recomienda revisar la explicación del proceso iterativo del área de influencia en las últimas guías (desde el año 2020 en adelante) de descripción del área de influencia disponibles en el Centro de Documentación del SEA en su sitio web, www.sea.gob.cl.

4.3 Datos meteorológicos

4.3.1 Fuente y calidad de datos meteorológicos disponibles

Existen dos tipos de datos meteorológicos: datos observados y datos generados por un modelo numérico. En todos los tipos de modelaciones de calidad del aire se requiere de al menos uno de estos datos.

Es recomendable realizar la modelación de calidad del aire con datos meteorológicos observados y extraídos desde el área de influencia de calidad del aire, sin embargo, en caso de no contar con estos datos y que, por la magnitud del proyecto, no fuese necesario instalar mediciones de las variables meteorológicas tanto de altura como superficie, se propenderá al uso de modelos numéricos que representen estas variables.

Los datos meteorológicos se dividen tanto en datos en superficie como de altura. En Chile, la información de ambos tipos, para los datos observados, es muchas veces escasa o inexistente, por lo que, en ocasiones será necesario generar²³ esta información para seguir las recomendaciones de esta Guía. Dicha información deberá ser representativa del área de influencia.

El porcentaje de datos válidos de las series de tiempo escogidas debe ser siempre superior al 75%²⁴ en un año, además, los datos en superficie y altura deben cubrir exactamente el mismo periodo. Respecto a la información en altura, el nivel mínimo debe cubrir los 200 metros medidos desde la superficie, en caso de que corresponda.

La escasez de información meteorológica en altura representativa²⁵ es una limitante en la evaluación de cualquier modelo. Para las mediciones en altura se recomienda utilizar tecnologías que permitan mediciones automáticas, tales como: a) torres meteorológicas, b) SODAR, c) RASS, d) LIDAR y e) Nefobasímetros. En caso de que se utilice algún método de medición remota (opciones b, c o d), este debe acompañarse de una torre de 40 metros de altura con fines de verificación de datos en superficie (*ground truthing*).

Por otro lado, el modelo numérico recomendado para la generación de datos meteorológicos es el WRF (*Weather Research and Forecasting Model*, por sus siglas en inglés). Este modelo es uno de los simuladores meteorológicos de pronóstico más avanzados, completos y en

4.

23 Lo anterior, por ejemplo, a través de la generación de líneas base de variables meteorológicas y estudios de caracterización del factor meteorológico asociado al transporte o formación de contaminantes.

24 Valor asociado a la validez de la información de monitoreo establecido en las normas primarias y secundarias de calidad del aire nacionales.

25 En Chile, los datos meteorológicos de altura provienen principalmente de radiosondeos de la Dirección Meteorológica de Chile en Antofagasta, Santo Domingo, Puerto Montt y Punta Arenas (vigentes al momento de elaboración de esta Guía). Estos datos representan la estructura vertical de la costa, que se diferencia sustancialmente de la continental. Además, se lanza solo una radiosonda por día (la excepción de Santo Domingo, donde se lanzan dos por día) lo que no permite un análisis de la evolución de la capa límite durante el día requerida para modelación. Por otra parte, no se realiza la medición a las 00:00 UTC, información relevante y necesaria para la implementación del modelo CALMET y la determinación de perfiles de gradiente vertical de temperatura.

constante mejora, mantenido por NCAR²⁶/NOAA²⁷ de Estados Unidos. Además, ha sido utilizado en la mayoría de los proyectos relacionados con el comportamiento atmosférico encargados por la Comisión Nacional de Energía, Ministerio del Medio Ambiente, entre otros²⁸.

4.3.2 Período modelado

En general, es recomendable que una simulación cubra toda la variabilidad climática relevante de la zona de interés, abarcando los rangos de variaciones para asegurar la inclusión de las condiciones meteorológicas más desfavorables. En Chile es importante tener en vista la escala de tiempo en la simulación, lo que considera ciclos anuales y otros tales como ENOS²⁹ con ciclos entre uno a tres años o más.

Sin embargo, por razones prácticas se recomienda una simulación de al menos un año completo para contaminantes primarios. Para la elección de ese año, se recomienda que se analicen al menos los tres años anteriores de datos observados en el dominio de modelación³⁰ a la fecha de presentación del proyecto al SEIA, o en su defecto aquellos tres años anteriores que cuenten con la data suficiente (75% según numeral 4.3.1 de esta Guía), y que en la revisión de estos antecedentes³¹ se escoja el escenario (año) de peor condición para la dispersión de los contaminantes. Se recomienda que la justificación del año elegido se realice sobre la base del período en el cual se registren las mayores concentraciones del contaminante en la zona de modelación, ya que, este parámetro tiene relación directa con el comportamiento de la atmósfera.

En el caso de modelaciones fotoquímicas, debido a la alta carga computacional que involucran y a que, además, se deben analizar dos escenarios (sin y con proyecto), se recomienda simular un mes por estación (enero, abril, julio, octubre³²). Con el fin de calcular las concentraciones anuales, se debe tomar cada mes como representativo de su respectiva estación del año. Además, para las modelaciones fotoquímicas se debe considerar el mismo criterio que con las modelaciones de contaminantes primarios para la elección del año a simular.

²⁶ National Center for Atmospheric Research, por sus siglas en inglés.

²⁷ National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés.

²⁸ Estudios como: Falvey *et al.*, 2010; Falvey *et al.*, 2009; Jorquera *et al.*, 2010; Schmitz *et al.*, 2007a; Schmitz *et al.*, 2007b; Schmitz *et al.*, 2010; Schmitz, 2011.

²⁹ ENOS se denomina al fenómeno del Niño-Oscilación del Sur, el cual presenta tres fases conocidas como El Niño, La Niña y Neutro.

³⁰ Privilegiando estaciones presentes en el área de influencia de calidad del aire, en caso contrario, se recomienda utilizar estaciones meteorológicas presentes entre el área de influencia y dominio de modelación meteorológico y cuyo emplazamiento presenten similitud en de condiciones meteorológicas del área de influencia de calidad del aire, según indicaciones de la Figura 11 de la presente Guía.

³¹ Los antecedentes deben presentarse tabulados, indicando, a partir de las variables críticas de dispersión, la elección del año más desfavorable. En caso contrario, se debe modelar el último año previo al año de ingreso del proyecto al SEIA.

³² En caso de no utilizar estos meses, el titular debe justificar técnicamente el uso de otros meses representativos de las estaciones del año.

4.3.3 Resolución horizontal de la grilla de modelación meteorológica

La resolución horizontal³³ de la grilla del modelo meteorológico está enfocada en capturar los fenómenos meteorológicos según sus escalas espaciales y temporales.

Independientemente, para cualquier configuración de la resolución horizontal es recomendable que se cuente con al menos 50 celdas de grilla en cada dirección (X e Y), considerado este valor como el mínimo para una correcta funcionalidad del modelo de calidad del aire utilizado³⁴. Este último valor responde a cualquiera de los dominios de modelación meteorológica.

Se recomienda que, a lo menos, las modelaciones meteorológicas cuenten con dos o tres dominios anidados de modelación **con una resolución horizontal máxima de 1,0 km para el último dominio**. Se debe considerar retroalimentación entre los dominios anidados. Cualquier cambio a esta resolución debe ser justificado técnicamente.

4.3.4 Modelo de calidad del aire y datos meteorológicos

Los distintos modelos de calidad del aire pueden utilizar tanto datos observados como datos obtenidos de un modelo numérico, como el caso del modelo WRF, por lo que a continuación se presentan algunos criterios para el uso de datos meteorológicos en los modelos Gaussianos, tipo *puff* y Eulerianos.

- **Modelo Gaussiano**

En el caso de los modelos Gaussianos que requieren meteorología de una sola estación (datos observados), los datos meteorológicos de superficie y altura deben provenir del área de influencia de calidad del aire del proyecto teniendo presente los lineamientos del numeral 3.2 de esta Guía. De no ser posible, pueden provenir de otro punto dentro del dominio de modelación, siempre y cuando sean representativos de la zona de dispersión y transformación de los contaminantes del proyecto, lo cual deberá ser justificado fundadamente.

Para estos modelos, el uso de datos observados, que representan información meteorológica objetiva del lugar, es siempre preferible al uso de datos de un modelo numérico. En este sentido, la información en superficie siempre debe provenir de una estación meteorológica.

³³ Corresponde a la distancia entre cada punto discreto del modelo meteorológico a partir de los cuales se resuelven las distintas ecuaciones de representación de las condiciones meteorológicas. Esta distancia corresponde a la disposición en el plano y no considera la resolución en altura, la cual está definida a partir de los datos de presión de la capa de mezcla.

³⁴ Realizada en base al funcionamiento de los distintos modelos recomendados. En el caso del modelo CALPUFF se sugiere no utilizar menos de 20 a 30 celdas de grilla (Atmospheric Studies Group, 2011). Para el caso de AERMOD se recomienda una resolución de 1 km en celdas de $10 \times 10 \text{ km}^2$ (U.S. EPA, 2021).

En el caso de información en altura, de no contarse con observaciones que cumplan con los requisitos de representatividad de la estación o validez de la serie de tiempo, se pueden usar alternativamente datos generados por un modelo numérico. El uso de información meteorológica en altura simulada por un modelo numérico, en reemplazo de observaciones, debe ser justificado técnicamente, en función de la magnitud del proyecto y sus potenciales impactos. La autoridad competente debe establecer si los datos meteorológicos de altura utilizados son los más adecuados en cada caso.

- **Modelo tipo *puffy Euleriano***

De acuerdo con lo establecido en el Informe técnico elaborado por la Untec³⁵, en el **caso de los modelos tipo *puffy Eulerianos***, si bien son capaces de representar meteorología heterogénea en el dominio de modelación, no tienen un desempeño muy superior a los modelos Gaussianos si se utilizan con información meteorológica **de solo una estación de superficie y un radiosondeo** como información de entrada. Ante la condición planteada, **se recomienda para estos modelos usar datos provenientes de un modelo numérico meteorológico**.

Además, para el caso del modelo CALPUFF se puede utilizar información meteorológica “híbrida”, es decir, tanto la información obtenida del modelo numérico meteorológico como la observada desde estaciones meteorológicas existentes en el área de influencia, incorporando ambos datos en el preprocesador CALMET, en caso de corresponder. Este método puede ser utilizado para mejorar la representación del modelo meteorológico, lo cual puede ser evaluado a través del análisis de incertidumbre de este.

Sin perjuicio de lo anterior, siempre se debe contar con observaciones de las variables meteorológicas de superficie para un período mínimo de un año, con el objeto de evaluar los resultados del modelo numérico meteorológico³⁶. La comparación de los datos observados con los simulados por el modelo en el punto de medición (observación) permite evaluar la incertidumbre de los datos meteorológicos tridimensionales generados y, por transitividad, tener un parámetro de evaluación del desempeño del modelo de calidad del aire.

La necesidad de medir datos meteorológicos en altura para evaluar los resultados del modelo numérico meteorológico debe ser evaluada caso a caso, en función de la magnitud de los impactos del proyecto y, la representatividad y validez de los datos disponibles. De no realizarse mediciones, el titular debe justificar técnicamente su exclusión. La autoridad competente debe establecer si los datos meteorológicos de altura utilizados son los más adecuados en cada caso.

35 Informe técnico “Uso de Modelos de Calidad del Aire en la Evaluación Ambiental de Proyectos - Elaboración de un Documento Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA” elaborado por la Untec para el SEA en el año 2011.

36 Véase numeral 6 de la presente Guía.

4.4 Datos topográficos y de uso de suelos

Los modelos requieren las características de la superficie del dominio de modelación. Se recomienda usar datos del USGS (*Land Cover Institute* del *Geological Survey*, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos. De su base de datos o de otras que proveen los modelos³⁷, se pueden obtener datos para Sudamérica, específicamente de Chile, de las siguientes variables: orografía, uso de suelo, línea costera y contenido de agua del suelo. Estas variables están disponibles en una resolución de 30 segundos (aproximadamente 1 km) y en algunos casos de hasta 90 metros.

Otras variables necesarias para algunos modelos son: albedo, rugosidad superficial, LAI (*Leaf Area Index*, por sus siglas en inglés) y razón de Bowen. De estas variables no existen bases de datos para Chile, por lo que se recomienda usar las tablas que proveen los modelos y que asocian estas variables al uso de suelo.

4.

4.5 Configuración de los modelos

Todos los modelos requieren ser configurados para su aplicación en cada caso específico. Estas configuraciones determinan características como el periodo y dominio geográfico de la simulación, resolución espacial horizontal y vertical, parametrizaciones físicas, formato de resultados, entre otros. Dado que la distribución espaciotemporal de las concentraciones de contaminantes depende en gran medida de la meteorología, la parametrización de este modelo requiere especial atención.

4.5.1 Parametrización modelo meteorológico

Los modelos meteorológicos necesitan ser configurados para representar la física y dinámica de la atmósfera, de manera de interpretar de la mejor forma posible, los procesos que allí ocurren. Además, estos modelos incluyen la parametrización espaciotemporal de la simulación, correspondiente al intervalo temporal de modelación, resolución horizontal y vertical del modelo, e inclusive, la forma de resolución de algunas ecuaciones fundamentales.

En general, se recomienda una configuración de los parámetros físicos y dinámicos que representen de la mejor forma posible las condiciones del dominio de modelación. Para ello, el titular debe entregar todos los archivos de ingreso del modelo que indiquen estas configuraciones³⁸, explicitando el uso de cada uno de estos parámetros, de manera que sea justificable en base a la caracterización del dominio y en específico, del área de influencia de

37 Véase enlaces como: <http://www.src.com>, o <https://www2.mmm.ucar.edu>

38 Véase Anexo III de la presente Guía.

calidad del aire. En el caso de las parametrizaciones espaciotemporales, tanto el intervalo de tiempo de modelación como las resoluciones deben coincidir con el modelo de calidad del aire, nunca siendo menores a las consideradas en este último modelo.

En el caso del modelo numérico meteorológico recomendado WRF, se debe hacer entrega del archivo *namelist.input* y *namelista.wps*³⁹, cuyas planillas de texto indican los parámetros físicos y dinámicos utilizados, además de las variables espaciotemporales. Se recomienda que las variables físicas y dinámicas sean justificadas en cuanto a su uso y aproximaciones. La sola indicación del parámetro no es justificación suficiente de su uso, incluso si su incertidumbre⁴⁰ se ve reducida, debido al proceso iterativo del dominio previo al ingreso al SEIA.

4.5.2 Parametrización modelo de calidad del aire

Los modelos de calidad del aire necesitan ser configurados para representar de la mejor forma posible los mecanismos de dispersión, y en caso de ser necesario, la transformación de los contaminantes producto de las distintas fuentes de emisión del proyecto, además de la parametrización espaciotemporal, que incluye la resolución horizontal y vertical del modelo, y la ubicación de los receptores discretos o de interés para la evaluación ambiental.

En general para este tipo de modelos se recomienda las configuraciones indicadas en manuales operativos y vigentes, en cuanto a los parámetros de representatividad de las formas de emisión, es decir, de fuentes puntuales, área, volumétricas, entre otras. Estos parámetros representan la distribución espacial de las emisiones, la altura de emisión y la altura del penacho⁴¹, entre otras variables de importancia. Cualquier cambio a las configuraciones recomendadas en manuales, debe ser justificado técnicamente, por lo que, el titular debe presentar de manera objetiva y clara las consideraciones al momento de ingresar al modelo las emisiones del proyecto y los receptores discretos o de interés⁴².

En el caso de las parametrizaciones espaciotemporales, tanto el intervalo de tiempo de modelación como las resoluciones deben coincidir con las ingresadas al modelo meteorológico.

- **Parametrización receptores**

En el modelo de calidad del aire se debe configurar una cuadrícula o **grilla de receptores**, diferente de los **receptores discretos**. Al definir la grilla de receptores más adecuada para

³⁹ Véase Anexo III de la presente Guía.

⁴⁰ Véase antecedentes de la incertidumbre del modelo meteorológico en el numeral 6 de la presente Guía.

⁴¹ La RAE (2021) define penacho como “masa de aire que contiene a menudo contaminantes sólidos, líquidos o gaseosos, vertida a la atmósfera por una chimenea”. Por tanto, se entenderá como la altura sobre la cual, dependiendo de las condiciones de operación de la emisión del contaminante, los contaminantes son liberados desde la salida de la fuente puntual.

⁴² Se deben presentar, como mínimo, los archivos indicados en el Anexo III de la Guía.

el proyecto, se debe asegurar que el tamaño de esta sea lo suficientemente grande para garantizar la cuantificación de la concentración máxima a nivel del suelo. El tamaño de la grilla requerida será específico del proyecto y variará según las características de las fuentes, los factores geofísicos y las condiciones meteorológicas.

Para un mejor desempeño del modelo⁴³, se recomienda la siguiente configuración asociados al número de grillas y espaciado de cuadrícula.

- Grilla 1: Espaciado de 20 [m] en el perímetro de la instalación y el área de mayor impacto de las emisiones atmosféricas.
- Grilla 2: Espaciado de 50 [m] para los primeros 0,5 [km] desde la fuente y sobre terreno elevado.
- Grilla 3: Espaciado de 250 [m] dentro de los 2 [km] desde la fuente.
- Grilla 4: Espaciado de 500 [m] dentro de los 5 [km] desde la fuente.
- Grilla 5: Espaciado de 1.000 [m] más allá de los 5 [km] desde la fuente.

Al definir **receptores discretos**⁴⁴, se deben tener en consideración las características del lugar de emplazamiento, tiempo de permanencia y uso permitido de suelo, caracterizando a estos receptores, presentando su ubicación y describiendo el tipo de receptor según objeto de protección.

Por último, se indica que cualquier cambio a las configuraciones recomendadas, incluyendo las del numeral 4.3 de esta Guía, deben ser justificadas técnicamente, y corresponde a la autoridad competente validar la configuración de los modelos en el proceso de evaluación.

43 En referencia a Alberta Environment and Sustainable Resource Development, 2013.

44 En el caso de los receptores humanos se debe considerar una altura de inmisión de entre 1,5 a 1,8 metros, correspondiente a la altura promedio de la zona de inhalación de los contaminantes atmosféricos por el cuerpo humano.

4.



5. PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS





5. PRESENTACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS

5.

Para poder evaluar de forma objetiva se requiere la presentación⁴⁵ de los datos utilizados para la modelación, así como de sus resultados, de modo tal que la modelación sea reproducible.

Todos los datos topográficos, datos observados, configuraciones de los modelos y resultados relevantes para la evaluación deben presentarse en forma detallada, incluyendo la fuente de información. En lo que sigue, se establecen los requerimientos mínimos de información a presentar.

5.1 Descripción y justificación del modelo

Se debe indicar claramente el modelo utilizado, incluyendo su versión. La elección debe siempre justificarse en base a los criterios presentados en el numeral 3 de esta Guía.

Además, se debe indicar, en la descripción del modelo, la fuente de información o modo de obtención de todos los datos de entrada (topografía, uso de suelo, meteorológicos, entre otros).

En el caso de utilizarse un modelo Gaussiano, debe analizarse si existen condiciones especiales, tales como variaciones de pendiente significativas, barreras físicas consolidadas, fumigaciones costeras u otros que perturben el carácter lineal de los flujos de viento dentro del área modelada.

⁴⁵ Desde que se presenta la DIA o EIA, los que deben ser actualizados cada vez que requieran ser modificados los criterios de la modelación.

5.2 Caracterización meteorológica

Se debe entregar una caracterización cualitativa de la situación meteorológica (y topográfica) del lugar. Esta caracterización debe incluir los procesos desde la mesoescala hasta la escala sinóptica. En base a esta, también se recomienda describir cómo estos procesos meteorológicos de distintas escalas espaciales influyen en los procesos de transporte, dispersión y transformación de contaminantes a distintas escalas temporales (desde la variabilidad diaria hasta la estacional), incluidos los procesos que ocurren en el área de influencia de la calidad del componente aire.

5.3 Bases de datos y archivos de modelación

Los resultados de la modelación deben venir acompañados de la base de datos respectiva en formato digital. Con el fin de verificar la correcta implementación de un modelo, se deben presentar en dispositivos digitales todos los archivos de entrada y de salida, incluyendo los datos meteorológicos, de terreno y otros que hayan sido incorporados en el sistema de modelación, cualquiera que este sea.

El detalle de los archivos mínimos asociados a los modelos con mayor recurrencia de uso en el SEIA se presenta en el Anexo III de la presente Guía⁴⁶. Esta información se considera esencial para el proceso de evaluación ambiental, en el caso que para el proyecto sea necesario presentar una modelación refinada.

5.

5.4 Características del dominio de modelación y su entorno

Se deben entregar planos⁴⁷ o gráficos a escala adecuada que permitan visualizar el contexto geográfico del proyecto, que abarquen el dominio de modelación y su entorno, y que contenga al menos la siguiente información:

- Límites del área de emplazamiento del proyecto, además de sus obras y acciones.
- Fuentes de emisión del proyecto.
- Fuentes de emisión en el entorno del proyecto.
- Receptores de interés (por ejemplo, presencia de población⁴⁸, establecimientos educacionales, de atención de salud, flora, fauna, entre otros).
- Usos de suelo considerados en la modelación.

46 En concordancia con lo indicado en el Instructivo que deja sin efecto OF. ORD. del ANT.1) y 2), e imparte instrucciones sobre foliación y registro de expedientes SEIA, con Of. Ord. D.E. N° 202099102718, del 14 de diciembre de 2020, o el instructivo que lo reemplace.

47 Los planos deben estar presentados en coordenadas UTM, Datum WGS84, Huso según corresponda. Además, se debe entregar esta información en formato KMZ.

48 Según la definición de población establecida en la "Guía para Evaluar el Riesgo para la Salud de la Población" (SEA, 2012) o aquella que la reemplace.

- 5.
- Orografía del área: incluir curvas de nivel que permitan visualizar claramente el terreno y los cambios de nivel abruptos, acorde a la escala del plano.
 - Cuerpos de agua.
 - Estaciones meteorológicas (altura y superficie) y de monitoreo de calidad del aire disponibles (del titular o terceros) o instaladas por el titular para la DIA o EIA.
 - Delimitación del dominio de modelación.
 - Escala, norte, simbología, vialidad y fuente de información.
 - Otra información de interés para la evaluación.

Además, en estos planos o gráficos se debe especificar la siguiente información:

- Resolución horizontal y vertical del dominio de modelación.
- Altura sobre el nivel del suelo de las concentraciones estimadas.
- Topografía y uso de suelo.

A modo de ejemplo, la Figura 2 muestra un mapa que incluye algunas de las características indicadas.

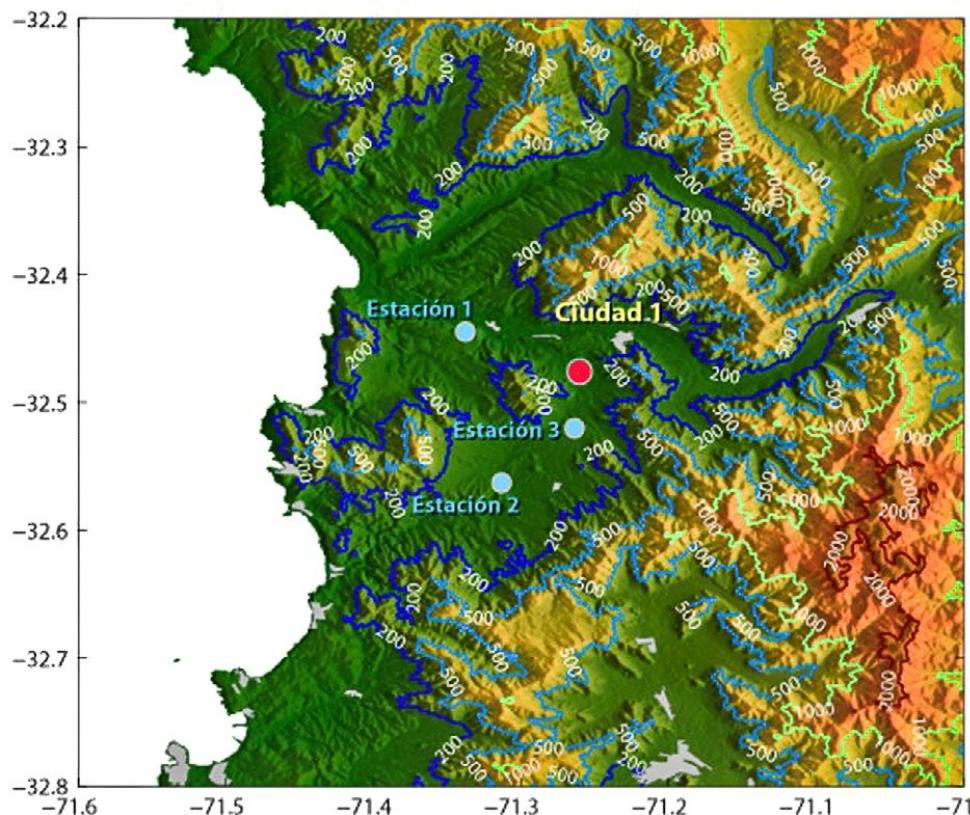


Figura 2. Ejemplo de un mapa topográfico que pone en contexto la fuente emisora (punto rojo), estaciones de monitoreo (puntos azules) y receptores de interés, como por ejemplo zonas pobladas (áreas grises)

Fuente: elaboración propia

En la Figura 2 se destaca una ciudad con nombre (Ciudad 1) por su cercanía a la fuente emisora (punto rojo).

5.5 Fuentes de emisión

Por cada fuente de emisión modelada se debe entregar, en archivo(s) editable(s), al menos la siguiente información⁴⁹:

- Parte, obra o actividad del proyecto con que se asocia.
- Fase del proyecto y período en que emite.
- Número de horas al día, días a la semana y meses del año en que opera la fuente emisora y las tasas de emisión asociadas.
- Tipo de fuente y cómo se incorporó al modelo (difusa, fija, móvil, puntual, de área, lineal, volumétrica).
- En el caso de fuentes puntuales: temperatura, caudal y velocidad de salida de los gases; para estos dos últimos parámetros indicar valores mínimos, máximos y promedios. Indicar si la modelación considera variaciones en la velocidad y temperatura de salida de los gases.
- Se debe exponer de manera clara la codificación de la fuente de emisión al momento de ingresarla al modelo de calidad del aire, es decir, que cada código sea claro en indicar a qué tipo de fuente corresponde.
- Contaminantes modelados.
- Concentraciones máximas, mínimas y promedios de las emisiones para cada contaminante.
- Tasas de emisión máximas, mínimas y promedio, tanto a nivel horario como anual. Indicar cuáles se utilizaron en la modelación.
- Características geométricas de las fuentes de emisión.

Se debe justificar técnicamente si no se ha modelado alguno de los contaminantes emitidos por el proyecto, incluyendo precursores de contaminantes secundarios.

Debe indicarse, además, cómo fueron obtenidas las tasas de emisión (factores de emisiones, emisiones de referencia, entre otros). En cualquier caso, se deben adjuntar las memorias de cálculo y documentos que respalden la información⁵⁰. Se deben indicar las referencias desde donde fueron obtenidos los factores de emisión utilizados, si corresponde. Asimismo, se debe entregar el código, número u otro mecanismo de identificación de cada uno de los factores utilizados⁵¹, así como los valores de los parámetros usados en los cálculos y todos los supuestos efectuados. Por último, se deben indicar claramente los niveles de actividad utilizados para la estimación de las emisiones. Lo anterior debe ser realizado de manera previa al ingreso del proyecto al SEIA.

⁴⁹ Esta entrega debe ser contenida dentro de la presentación del proyecto en el SEIA, y ser actualizado cuando corresponda.

⁵⁰ Las memorias de cálculo de las tasas de emisión deben ser presentadas en formato Excel (xlsx.), detallando tanto las tasas como la metodología de estimación de estas.

⁵¹ En el caso de factores del documento AP-42 de la U.S. EPA, se debe entregar el número SCC (*Source Classification Codes, por sus siglas en inglés*).

Por otro lado, se debe entregar una figura del área de emplazamiento del proyecto a escala adecuada con la siguiente información:

- Distribución en planta (*layout*) de las partes y obras del proyecto, y del lugar de ejecución de las acciones, que incluya todas sus fuentes de emisión, distinguiendo entre fuentes de la fase de construcción, operación y cierre (cada fase debe presentarse en figuras por separado). Además, debe mostrarse en la figura el punto, línea o polígono que representa las fuentes modeladas y su identificador en el modelo.
- Edificaciones cercanas y la descripción de su altura.
- Escala, norte, simbología, grilla de referencia.

Para el caso de proyectos que presente sus tasas de emisión en relación con balances de materia o masa, se solicitará como mínimo presentar la información contenida en el Anexo IV de la presente Guía.

5.6 Presentación de datos meteorológicos y de calidad del aire observados

5.6.1 Datos de calidad del aire

Los valores observados de calidad del aire deben presentarse tabulados. En el caso de utilizarse distintos valores de calidad del aire para distintas zonas, estos deben presentarse en un mapa del dominio de modelación. Sin perjuicio de lo anterior, también se deben presentar los datos según se indica en el numeral 5.6.3 de esta Guía.

El proyecto debe indicar claramente el período de mediciones y la justificación y análisis de la representatividad de dichas mediciones del dominio de modelación. Lo anterior de manera previa al ingreso al SEIA y en concordancia con lo establecido en el numeral 8.1 de esta Guía.

Además, se debe presentar un análisis completo de los datos utilizados, incluyendo el porcentaje de datos válidos y el método de validación. Se debe especificar el tratamiento de los registros faltantes y datos nulos.

Utilizando las mediciones meteorológicas registradas en el mismo punto y período que las mediciones de calidad del aire, se deben analizar las variaciones de las concentraciones en función de la meteorología, según se muestra en la Figura 4.

5.6.2 Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos observados pueden ser usados como datos de entrada para los modelos (en el caso de modelos Gaussianos) o con el fin de evaluar los resultados del modelo de pronóstico (en el caso de modelos tipo *puff* o Eulerianos).

Por la relevancia de la información meteorológica en la modelación de calidad del aire, se debe presentar un análisis completo de los datos meteorológicos observados, incluyendo el porcentaje de datos válidos y el método de validación utilizado. Se debe también especificar el tratamiento de los registros faltantes, datos nulos y vientos en calma. Respecto a los vientos en calma, se debe indicar el período del día y del año en que se presentan y el porcentaje del período en que estos ocurren.

Se debe indicar la tecnología usada para las mediciones en altura, según lo señalado en el numeral 4.3.1 de la Guía.

5.6.3 Presentación de datos

Para los **datos observados** se recomienda que su presentación contenga como mínimo lo siguiente:

a) Series de tiempo

Para cada estación en superficie y variable meteorológica como para las de calidad del aire se deben graficar sus respectivas series de tiempo completas para analizar la calidad de la información. Las variables meteorológicas relevantes son la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa.

Estos gráficos permiten un análisis cualitativo de los datos en términos de completitud de la serie y períodos con datos faltantes, valores fuera de rango y problemas de equipo (datos constantes, tendencias, entre otros). Asimismo, se debe analizar la relevancia de la información e identificar eventos aislados.

A modo de ejemplo, la Figura 3 muestra una serie de tiempo de la velocidad del viento con períodos con datos faltantes.

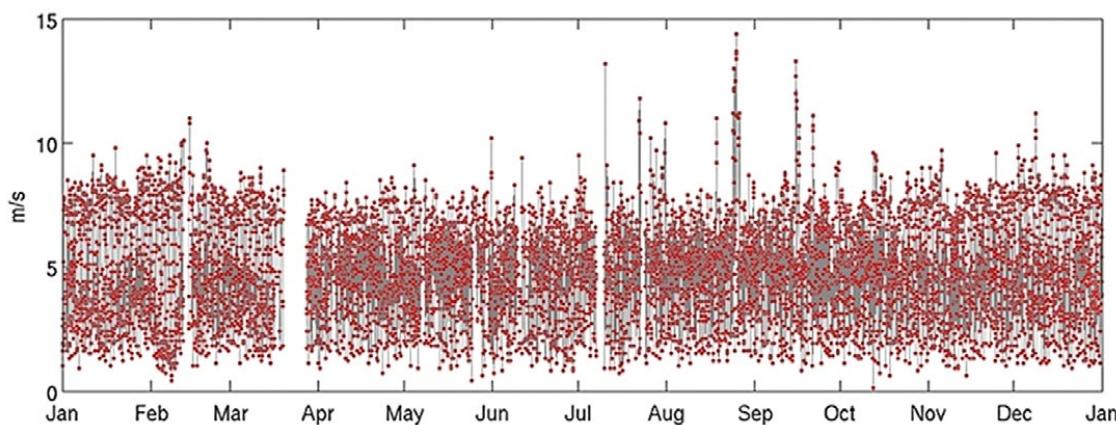


Figura 3. Ejemplo de una serie de tiempo de velocidad del viento

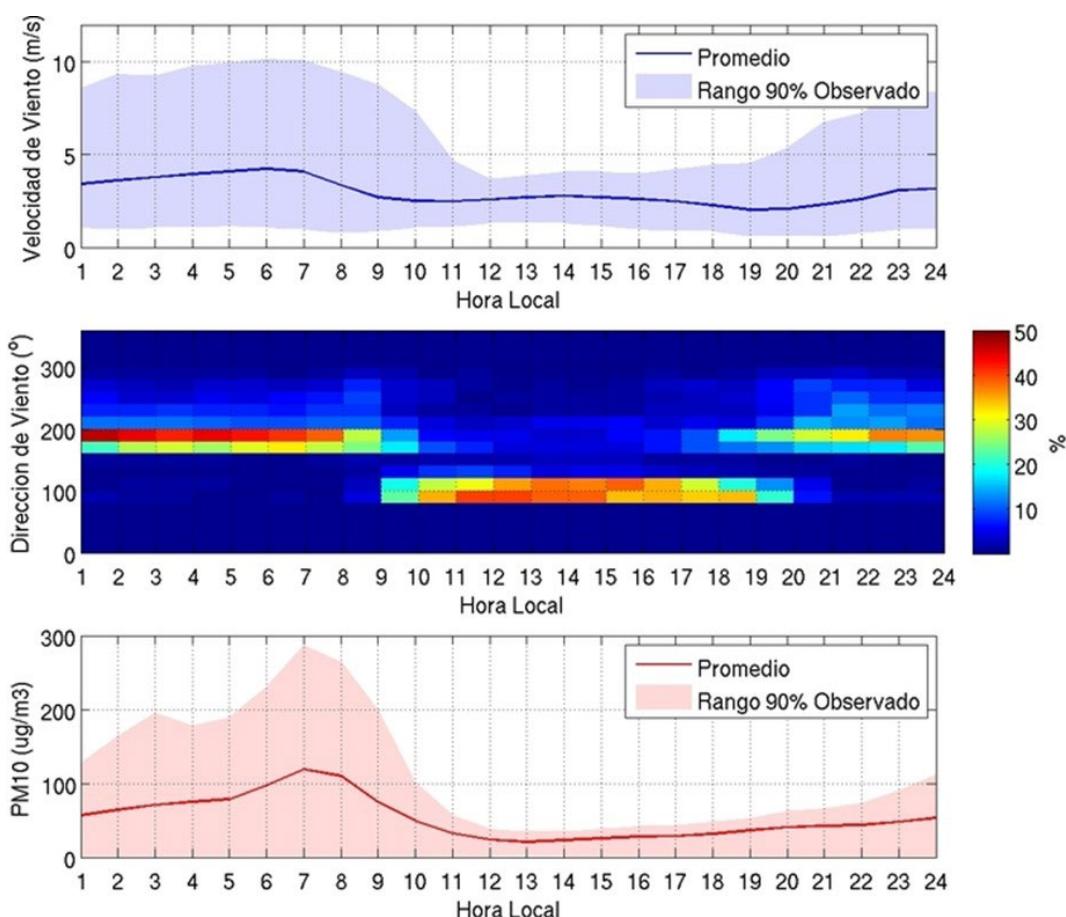
Fuente: elaboración propia

b) Ciclos diarios

Para cada estación en superficie y variable meteorológica (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa), además de los datos observados de calidad del aire, se deben graficar sus respectivos ciclos diarios promedios junto con su variabilidad en términos de los percentiles 5 y 95. Estos gráficos muestran tanto la variación típica de cada variable como su variabilidad interdiaria.

A modo de ejemplo, la Figura 4 muestra los ciclos diarios de velocidad del viento (gráfico superior), dirección del viento (gráfico central) y concentraciones de MP10 medidas (gráfico inferior). Las líneas indican los ciclos diarios promedio y los límites superior e inferior de las sombras indican los percentiles 95 y 5, respectivamente. En el caso de la dirección del viento, se indica el porcentaje de la dirección observada. Se recomienda incluir siempre la velocidad y dirección de viento junto con las variables de calidad del aire.

Figura 4. Ejemplo de gráficos de ciclos diarios promedios de velocidad del viento (gráfico superior), dirección del viento (gráfico central) y concentración medida de contaminantes (gráfico inferior)



Fuente: elaboración propia

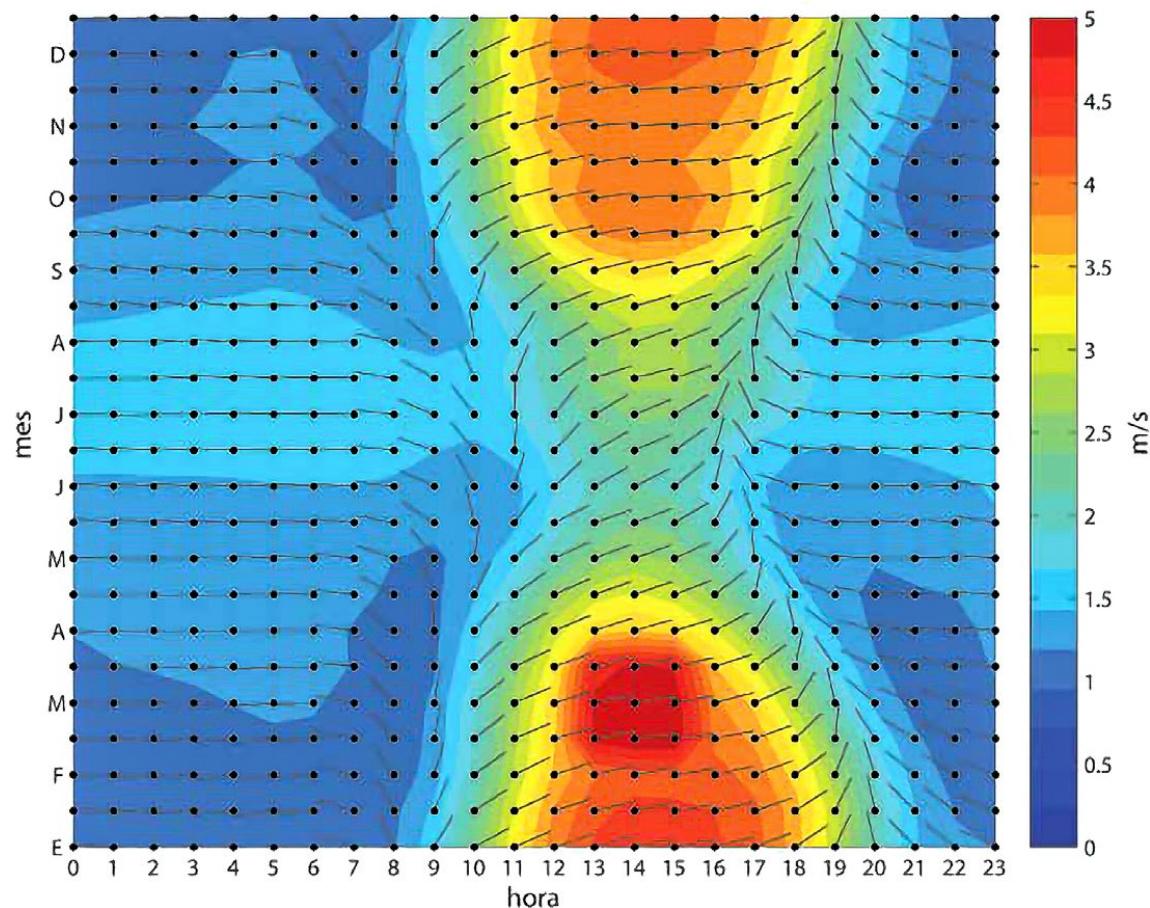
El tipo de gráfico de la Figura 4 pone en contexto las mediciones *in situ* de las variables meteorológicas y de calidad del aire. La dirección del viento se indica en este ejemplo en términos de la frecuencia con intervalos de 20 grados.

c) Ciclos estacionales

Para cada estación en superficie y variable meteorológica (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa), y de calidad del aire, se debe ilustrar la variación estacional de sus ciclos diarios.

A modo de ejemplo, la Figura 5 muestra el ciclo estacional de la velocidad (colores) y dirección del viento (puntos con línea, donde la línea indica la dirección).

Figura 5. Ejemplo de gráfico del ciclo estacional de viento



Fuente: elaboración propia

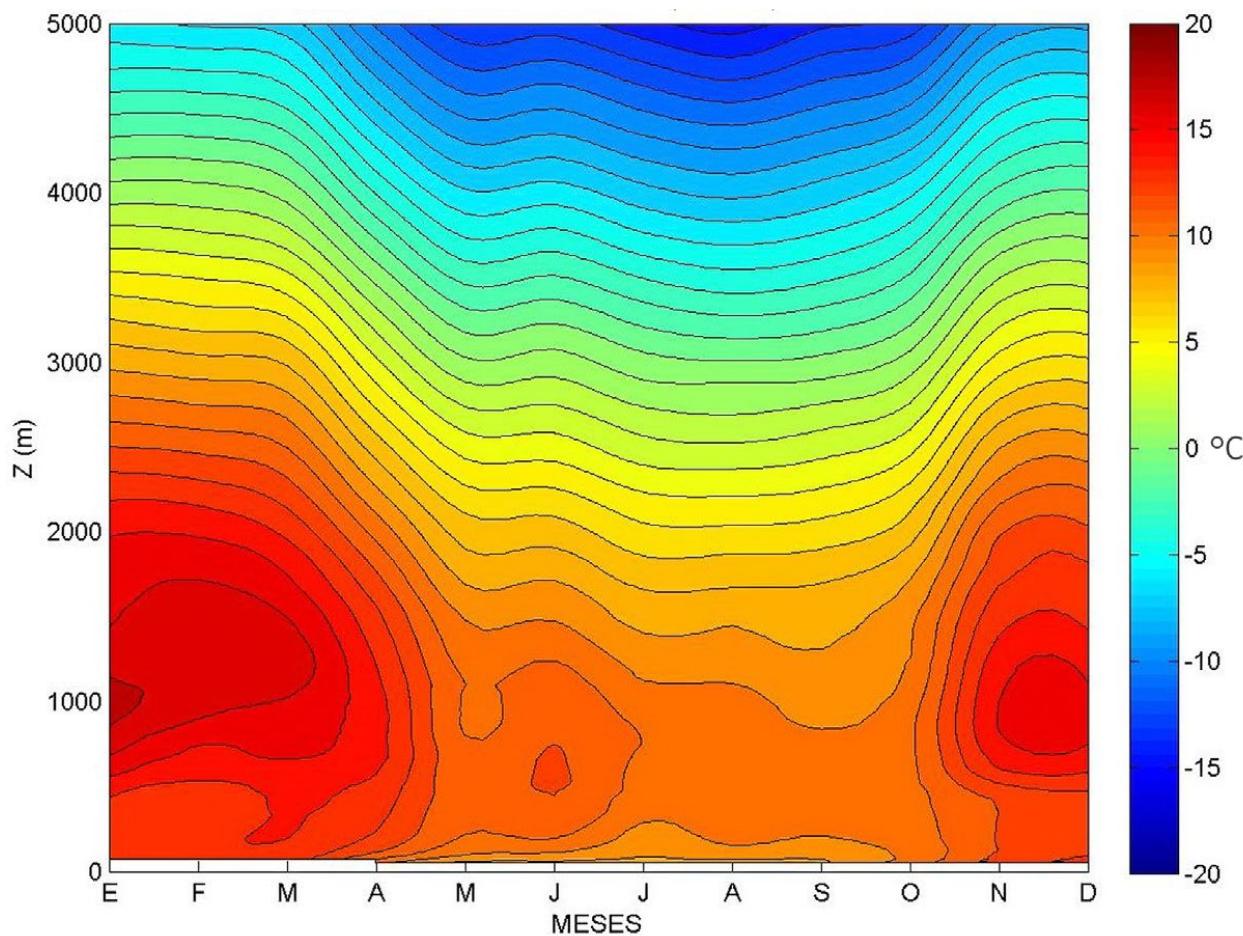
En la Figura 5, con colores se muestra el ciclo diario (eje X) de la velocidad del viento para todos los meses (eje Y). También se indica lo mismo para la dirección del viento a través de puntos con línea, donde la línea indica la dirección.

d) Datos en altura

Cuando corresponda, se debe graficar el ciclo estacional de la variable de temperatura, velocidad y dirección de viento en altura. A modo de ejemplo, la Figura 6 muestra el ciclo estacional de un perfil vertical de temperatura.

Si se cuenta con mediciones continuas, también se deben graficar los ciclos diarios de las variables.

Figura 6. Ejemplo de gráfico del ciclo estacional de un perfil vertical de temperatura



Fuente: elaboración propia

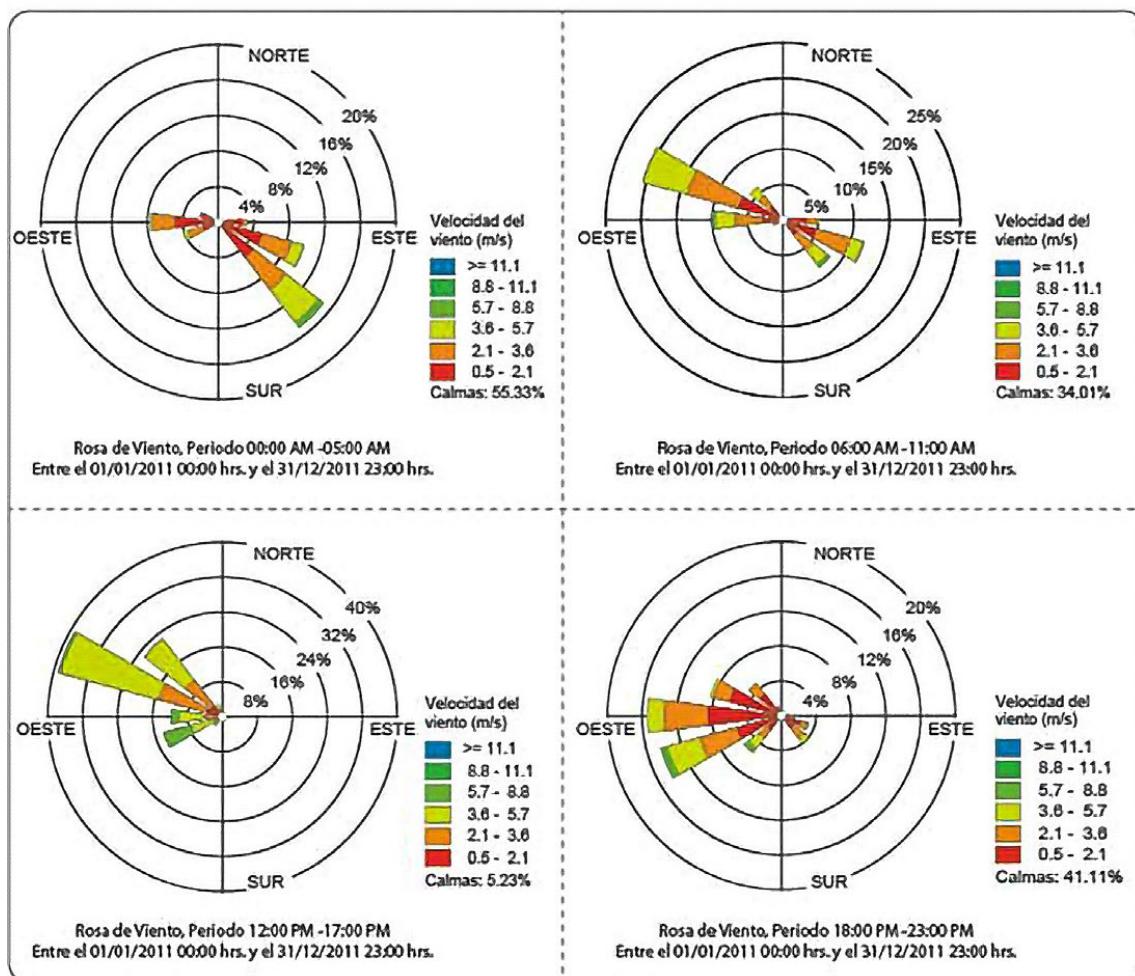
En la Figura 6, en el eje X se indican los meses y en el eje Y la altura en metros sobre la superficie.

e) Rosas de vientos

La variabilidad de la velocidad y dirección del viento siempre deben ser caracterizadas según el ejemplo de la Figura 4. Adicionalmente, esta información se puede presentar a través de rosa de viento.

A modo de ejemplo, la Figura 7 expone rosas de viento que grafican la variabilidad temporal del viento.

Figura 7. Ejemplo de rosas de vientos que muestran la variabilidad temporal del viento



Fuente: elaboración propia



5.7 Presentación de los resultados de la modelación meteorológica

5.

En caso de utilizarse datos meteorológicos obtenidos de un modelo matemático en la modelación de calidad del aire, se debe indicar el modelo utilizado, su versión y su configuración en términos de resolución espacial (horizontal y vertical) y parametrizaciones.

Para los **datos meteorológicos modelados** se recomienda que su presentación contenga como mínimo lo siguiente:

a) Series de tiempo, ciclos diarios y estacionales, y rosas de viento

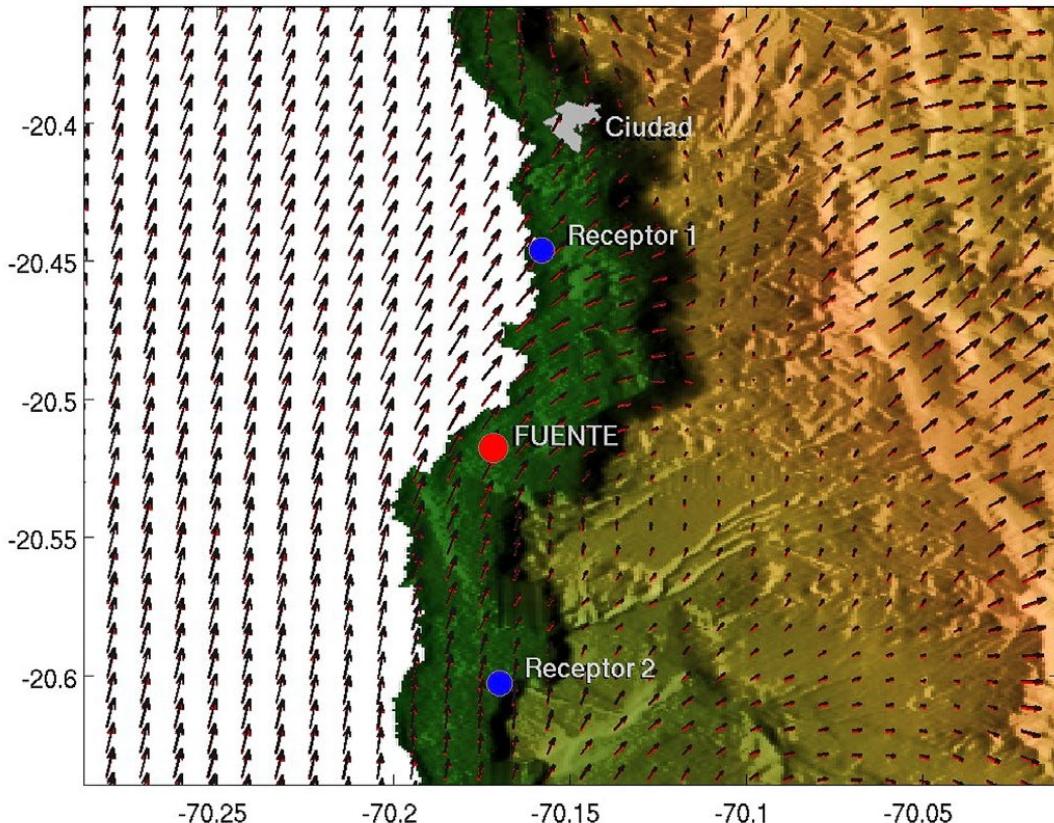
Con el fin de comparar los resultados de los modelos con las observaciones, se deben presentar las series de tiempo, ciclos diarios promedios, ciclos estacionales y rosas de viento equivalentes a los señalados en el numeral 5.6 de esta Guía.

b) Mapas de viento

Se debe presentar como mínimo los patrones espaciales de viento en el contexto geográfico de la modelación, mediante mapas de viento, donde este debe estar representado en términos de su magnitud y dirección. Estos deben incluir como mínimo los promedios de viento nocturno/diurno. También se deben presentar ambos patrones promedios para estaciones del año particulares (verano/invierno) y para horas críticas para los receptores de interés (para percentil 90 del modelo de calidad del aire).

La Figura 8 muestra, a modo de ejemplo, los vientos junto a puntos de interés. Se debe considerar el estándar cartográfico de acuerdo con lo indicado en el numeral 5.4 de esta Guía.

Figura 8. Ejemplo de un mapa de viento



Fuente: elaboración propia

El tipo de gráfico de la Figura 8 muestra la variabilidad espacial del viento. En este caso el viento se indica a través de flechas cuyo largo es proporcional a la velocidad del viento.

c) Datos en altura

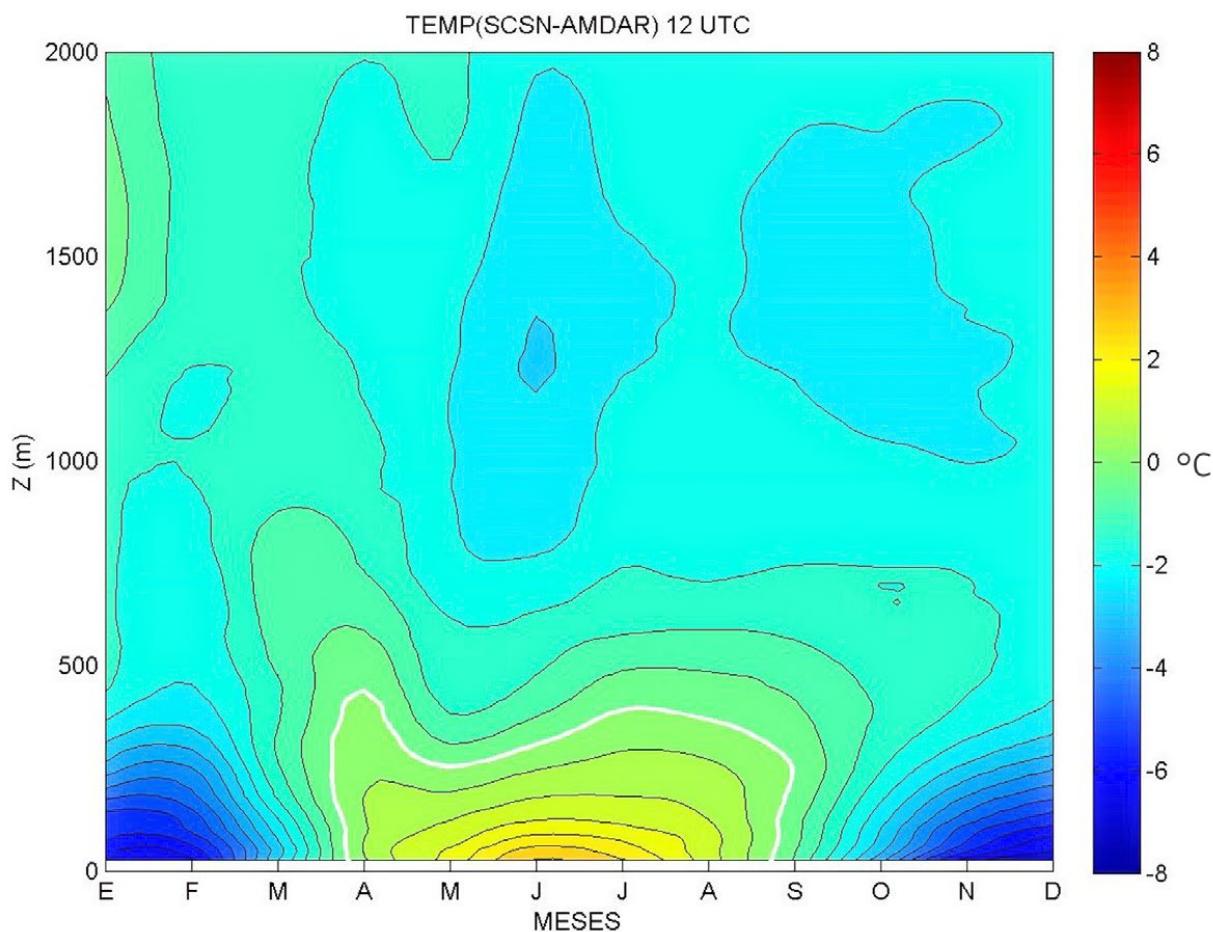
Para los datos en altura se deben presentar los gráficos equivalentes de las observaciones, según lo indicado en el numeral 5.6.3 de esta Guía.

La estructura vertical de la atmósfera determina su capacidad de mezclar contaminantes y, por ello, la comparación entre valores modelados y observados permite analizar una posible sobre o subestimación de las concentraciones. En este sentido, se recomienda poner en contexto las estructuras verticales modeladas y observadas (estas últimas en caso de corresponder). Por lo anterior, además de los gráficos mencionados, también se deben presentar gráficos de la diferencia entre la estructura vertical de la temperatura observada y la simulada en el mismo punto de las observaciones. Se recomienda generar estos gráficos de las diferencias tanto para el ciclo diario como el estacional. De no existir

datos observados suficientes para generar ciclos diarios, se recomienda por lo menos distinguir entre perfiles representativos para la noche y el día.

A modo de ejemplo, la Figura 9 muestra la diferencia entre el perfil vertical de temperatura observado y el simulado.

Figura 9. Ejemplo de un gráfico de la variación estacional de la diferencia de los perfiles verticales de temperatura observados y simulados



Fuente: elaboración propia

En el eje X de la Figura 9 se indican los meses y en el eje Y la altura en metros sobre la superficie. Este tipo de gráfico permite analizar la capacidad del modelo de representar la estructura vertical de la atmósfera y, por lo tanto, la estabilidad atmosférica en el lugar de interés.

5.8 Análisis de los datos meteorológicos

El análisis debe indicar claramente el período de datos meteorológicos considerado en la modelación de calidad del aire.

Se deben indicar los valores y temporalidad de las variables meteorológicas utilizadas (por ejemplo, horaria, diaria, valor único), y si corresponden a observaciones, estimaciones, simulaciones o supuestos. En el caso de efectuarse estimaciones, se debe señalar la metodología utilizada (por ejemplo, modelo de pronóstico). Todos los supuestos deben ser justificados técnicamente. En el caso de las variables obtenidas de estaciones de monitoreo (datos observados), se debe señalar la o las estaciones donde fueron obtenidas, según identificación utilizada en la figura del dominio de modelación descrita en el numeral 5.6 de esta Guía.

A modo de ejemplo, a continuación se señalan algunas variables requeridas por los modelos y que deben ser reportadas, cuando corresponda: velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, radiación solar, radiación solar neta, humedad relativa, altura de capa de mezcla, clase de estabilidad, cubierta de nubes, altura de nubes (*ceiling height*), perfiles verticales de datos meteorológicos de altura (velocidad y dirección del viento, temperatura, turbulencia vertical, turbulencia horizontal, presión, temperatura potencial), flujo de calor superficial, flujo de calor antropogénico, entre otros.

Si corresponde, se debe especificar el preprocesador de datos meteorológicos utilizado.

Considerando que la meteorología es el componente principal que determina la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de contaminantes, es fundamental entregar un análisis riguroso de la misma. Este análisis debe tener tres componentes, según corresponda:

5.

a) Diagnóstico con base en los datos observados

Es fundamental describir la variabilidad temporal de cada una de las variables meteorológicas medidas en cada estación. Para esta descripción, se debe usar los gráficos indicados en el numeral 5.6.3 de esta Guía. La descripción debe permitir llegar a un diagnóstico de la variabilidad temporal desde la escala diaria hasta la estacional. Además, se recomienda entregar una interpretación en términos de los procesos responsables de esta variabilidad temporal.

b) Comparación entre modelo y observaciones

Todo modelo matemático que busca representar una realidad tiene asociado errores o incertidumbres. Es importante, por lo tanto, analizar estos errores, comparando los resultados del modelo con las observaciones, ya sea en forma cualitativa como cuantitativa.

El análisis cualitativo se debe realizar sobre la base de la comparación de los gráficos indicados en los numerales 5.6.3 y 5.7 de esta Guía. En base a la comparativa, principalmente, de los ciclos diarios de las variables meteorológicas observadas y simuladas, en una misma ubicación, se debe caracterizar la capacidad del modelo de reproducir las observaciones tanto en magnitud como en su variabilidad.

La parte cuantitativa se debe realizar calculando como mínimo las métricas estadísticas del sesgo (error medio), coeficiente de correlación y error cuadrático medio. Se debe incluir en este cálculo las variables temperatura y velocidad del viento y, de ser necesario para una mejor caracterización del caso, otras variables de las que se tengan mediciones. Dependiendo del caso, algunas de estas estadísticas (sesgo, coeficiente y error medio) se debe calcular para horarios o estaciones críticas. Es recomendable que esta comparación cuantitativa no solo se realice para la situación promedio, sino que también para situaciones desfavorables para la dispersión.

Para más detalle, revisese numeral 6 de esta Guía.

c) Descripción de patrones espaciales a través de los resultados del modelo

Si bien el diagnóstico en base a los datos observados entrega la descripción más objetiva posible, no permite una caracterización espacial completa. Para este tipo de caracterización (solo en el caso de que se haya usado un modelo tipo *puffo* Euleriano), se requiere utilizar la información del modelo meteorológico. Los gráficos equivalentes al que se entrega en la Figura 8 son esenciales para describir los patrones espaciales. Como ya se mencionó, es importante entregar estos gráficos no solo para las situaciones promedio, sino también para situaciones críticas (por ejemplo, horarios o estaciones críticas). Esta descripción permite al evaluador(a) visualizar los patrones espaciales de circulación en el dominio. En conjunto con las estimaciones de errores, se debe entregar además una estimación de confiabilidad de estos patrones.

5.9 Presentación de los resultados de la modelación de calidad del aire

a) Series de tiempo, ciclos diarios y estacionales

Se deben presentar las series de tiempo, ciclos diarios promedios y ciclos estacionales de las variables de calidad del aire modeladas en cada receptor de interés. Los ciclos diarios promedios deben presentarse junto con la información de velocidad y dirección del viento, según se muestra en la Figura 4. Los receptores pueden representar puntos (por ejemplo, viviendas) o áreas (por ejemplo, centros poblados). El receptor que represente un área debe corresponder al punto de grilla del modelo **con las concentraciones máximas dentro de esa área**.

b) Mapas de dispersión del contaminante

La evaluación debe incorporar figuras que abarquen el dominio de modelación y que contengan la misma información señalada en el numeral 5.4 de esta Guía (plano de localización del proyecto) a una escala adecuada, con contornos de isoconcentración para cada contaminante y promedio temporal de interés. Además, se debe incluir junto al mapa todos los insumos con los que construyeron, incluyendo las isolíneas en formato KMZ.

Las unidades y promedios temporales dependerán del valor referencial contra el cual se compararán las concentraciones estimadas para evaluar el impacto, que puede ser:

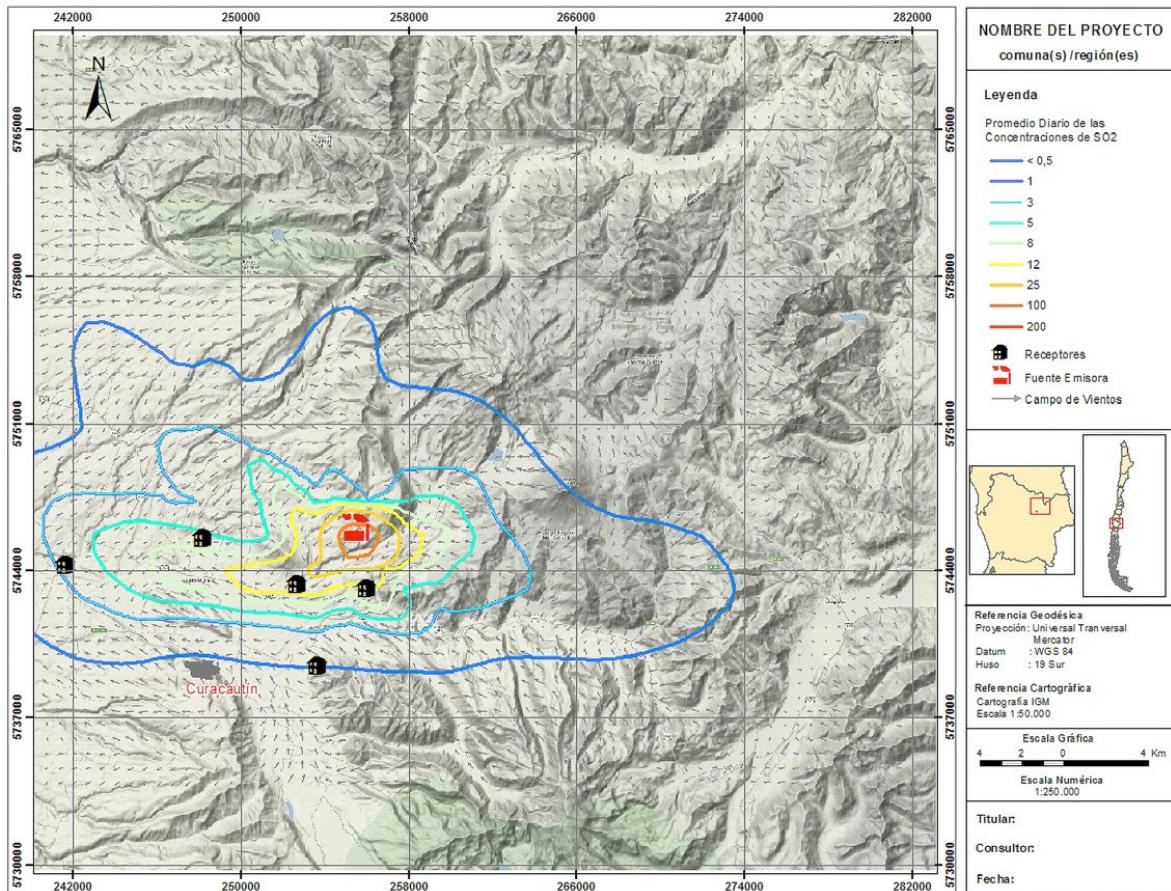
- El valor establecido en una norma de calidad ambiental, ya sea primaria o secundaria, dependiendo del impacto a evaluar.
- El valor establecido en una norma de referencia de los estados que establece el Reglamento del SEIA en el Título II, en el caso de no existir norma de calidad ambiental nacional.
- De no existir normativa para el contaminante, un valor referencial de organismos nacionales o internacionales (por ejemplo, *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, Organización Mundial de la Salud), a partir de información toxicológica o epidemiológica, de estudios específicos de suelo, flora o fauna, entre otros.

Cada figura debe representar el comportamiento de la pluma en aquel período en que ocurre la máxima concentración del proyecto o actividad, es decir, cuando ocurre el máximo impacto. Asimismo, deben incluirse figuras del período en que ocurre la máxima concentración en los receptores de interés, en el caso de ocurrir en un período distinto al máximo global, destacando el receptor con el mayor impacto asociado. En dichas figuras, se debe señalar claramente el dominio de modelación.

En el caso de simulaciones fotoquímicas y debido a las incertidumbres de los inventarios de emisiones, los valores absolutos de las concentraciones que entregan los modelos no tienen la confiabilidad necesaria para ser usados directamente en la evaluación. En consecuencia, se deben realizar dos simulaciones, una sin y otra con proyecto (véase Anexo II de esta Guía). De esta manera, el resultado de la modelación no será las concentraciones absolutas sino la diferencia entre ambas simulaciones, para la que se deben generar los gráficos correspondientes. Esta diferencia se asocia al impacto del proyecto y se debe adicionar a las concentraciones observadas.

La Figura 10 muestra un ejemplo de mapa de dispersión del contaminante. Este tipo de gráfico presenta la variabilidad espacial de las concentraciones de este, para un promedio temporal específico. El contexto geográfico se establece en este ejemplo a través de un mapa topográfico, la fuente emisora y receptores de interés. También se incluyen en este gráfico los flujos de viento de manera tal de entender el patrón de dispersión.

Figura 10. Ejemplo de mapa de dispersión para concentraciones de SO₂



Fuente: elaboración propia

c) Tablas de concentración del contaminante

Además de las figuras indicadas, las concentraciones en el PMI y **en cada receptor de interés** (por ejemplo, zonas habitadas, establecimientos educacionales, de atención de salud, fauna, flora, entre otros) deben ser entregadas tabuladas, considerando las unidades y temporalidad correspondiente a los estándares de calidad o valores referenciales que se utilizarán para evaluar los impactos e indicando la coordenada asociada. La concentración reportada asociada a un área de interés⁵² como una zona poblada, debe corresponder a la máxima concentración estimada por el modelo en dicha área.

52 Cabe aclarar que por área de interés se hace referencia a una zona geográfica donde se ubican una cantidad finita o determinada de objetos de protección, en este caso, se plantea una zona poblada que representa una cantidad finita de viviendas (personas). Esta área de interés está contenida dentro del área de influencia del objeto de protección correspondiente.

Se recomienda incluir, además, las concentraciones modeladas en los puntos de monitoreo de calidad del aire existentes y en cualquier otro punto que se estime relevante para la evaluación. Sin embargo, **el análisis de la significancia del impacto debe ser realizado sobre el receptor de interés, correspondiente al objeto de protección, según lineamientos antes mencionados.**

Las concentraciones finales corresponden a las proyectadas por el modelo⁵³ junto con los aportes de otros proyectos con RCA favorable que no hayan sido ejecutados y que sus áreas de influencia de la componente aire confluyan, adicionadas a las concentraciones observadas para la condición base o línea de base⁵⁴. Lo anterior se debe comparar con los estándares de calidad ambiental vigentes, nacionales o de los Estados que señala el Reglamento del SEIA, para evaluar el cumplimiento o la superación de estos valores⁵⁵.

En el caso de que corresponda presentar los aportes de otros proyectos, el titular debe agregar a sus receptores los que haya presentado el otro proyecto con RCA favorable, de modo de cuantificar en estos la sumatoria de los impactos de ambos proyectos. Este análisis considera **el efecto acumulado de las incidencias individuales sobre el objeto de protección dentro del área de influencia**, con el objeto de evaluar la condición menos favorable al momento de calificar el proyecto o actividad.

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se presenta la recomendación de tabulación para el caso del aporte de Material Particulado (MP) Respirable por parte del proyecto o actividad, para cada fase que sea pertinente el análisis⁵⁶. Cabe indicar que, independiente a la presentación de la Tabla 1 siempre se debe especificar la condición base o línea de base para cada uno de los receptores presentados en relación con los criterios establecidos en el numeral 3.1 de la “Guía para la Descripción de la Calidad del Aire en el Área de Influencia de Proyectos que ingresan al SEIA” (SEA, 2015), por lo que, y en función de su ubicación, los receptores pudiesen contar con distintas condiciones basales del contaminante para su análisis, cuyo valor debe ser justificado técnicamente. Lo anterior, para determinar el proceso de evaluación del impacto según los distintos lineamientos entregados por el SEA, en sus distintas guías o documentos de evaluación ambiental.

⁵³ Correspondientes al aporte del proyecto o actividad.

⁵⁴ Se aclara que las concentraciones observadas consideran todos los proyectos ejecutados al momento de su medición, por lo que se debe revisar esta información al momento de evaluar las concentraciones finales.

⁵⁵ En relación con la letra a) del artículo 5º que indica “La superación de los valores de las concentraciones y períodos establecidos en las normas primarias de calidad ambiental vigentes [...]” y la letra d) del artículo 6º que indica “La superación de los valores de las concentraciones establecidos en las normas secundarias de calidad ambiental vigentes [...]”, ambos del Reglamento del SEIA.

⁵⁶ El titular debe justificar la evaluación de cada fase, indicando claramente el descarte de evaluación de una fase. Se indica que, la sola consideración de la cantidad de emisiones para descartar la modelación de una fase no es argumento completo, ya que pudiesen darse los casos en que las fuentes de esa fase (con menores emisiones) estuviesen más cercanas a receptores sensibles, por lo que la justificación, debe considerar tanto magnitud, extensión y duración del impacto para el descarte de la modelación de una fase.

Tabla 1. Recomendación de tabulación del impacto para el caso de MP Respirable⁵⁷

| Receptores | Coordenadas UTM (m) | Métrica | Condición o Línea de Base (µg/m³) | Aporte proyecto (µg/m³) | Aporte otros proyectos con RCA (µg/m³) | Concentración final (µg/m³) | Norma (µg/m³) |
|---------------------|----------------------------|----------------|---|---|--|---|---------------------------------|
| | | | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>A+B+C</i> | |
| PMI | x, y | Anual | | | | | |
| | | 24 hr | | | | | |
| Receptor 1 | x, y | Anual | | | | | |
| | | 24 hr | | | | | |
| Receptor 2 | x, y | Anual | | | | | |
| | | 24 hr | | | | | |
| Receptor "n" | x, y | Anual | | | | | |
| | | 24 hr | | | | | |

Fuente: elaboración propia

5.9.1 Cantidad de cifras de los resultados de la modelación de calidad del aire

Los resultados de la modelación de calidad del aire deben ser presentados sobre la base de una cantidad finita de cifras que aporten a la reducción de la incertidumbre y a la evaluación de los impactos sobre los distintos objetos de protección. Por lo tanto, la cantidad de cifras debe ser concordante con el error de medición o precisión de los equipos utilizados en el mercado para el muestreo del contaminante específico, sin que esto indique necesariamente que se deba realizar un muestreo, a menos que así se proponga como medida del proyecto.

En el caso del MP es esperable una cantidad máxima de tres cifras decimales en la presentación de los resultados de la modelación de calidad del aire.

⁵⁷ MP10 y MP2,5.

6.

ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE





6. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

Cualquier modelo numérico representa una aproximación a la realidad y, en consecuencia, sus resultados tienen una incertidumbre⁵⁸ asociada. Como fenómeno probabilístico, la incertidumbre está presente tanto en la estimación de emisiones, como en los modelos meteorológicos y modelos de calidad del aire, debido a que todos estos modelos buscan representar, de manera cuantitativa, una realidad en una determinada área.

6.

⁵⁸ La incertidumbre tiene distintos matices en su definición según la fuente. La RAE define a la incertidumbre como la "falta de certidumbre o certeza", mientras que la certidumbre o certeza como "el conocimiento seguro o claro de algo", por tanto, la incertidumbre se podría interpretar como "la falta de conocimiento seguro o claro de algo". A su vez, la ISO 9001/2015 Sistema de Gestión de Calidad e ISO 14001/2015 Sistema de Gestión Medio ambiental definen la incertidumbre como "el estado, incluso parcial, de deficiencia de información relacionada con la comprensión o conocimiento de un evento, su consecuencia o probabilidad". Complementariamente, la ISO/IEC 31010 indica que "la incertidumbre es un término que abarca muchos conceptos subyacentes", indicando entre estos conceptos la incertidumbre aleatoria; "incertidumbre que reconoce la variabilidad intrínseca de algunos fenómenos y que no puede reducirse con más investigaciones (Principio de la Incertidumbre de Heisenberg)" o la incertidumbre epistémica: "incertidumbre que generalmente resulta de una falta de conocimiento y que, por lo tanto, puede reducirse reuniendo más datos, refinando modelos, mejorando técnicas de muestreo, entre otras". A lo anterior, podemos sumar la incertidumbre computacional o numérica generada debido a la simplificación o aproximación de las ecuaciones de la representación de algún modelo (natural o artificial), lo que se debe a las soluciones numéricas, aproximaciones, configuraciones, capacidad y precisión de la computadora, errores de redondeo de los sistemas digitales, entre otros. Por otro lado, la "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida: Evaluación de datos de medición" (JCGM 100:2008) señala que para el caso de las incertidumbres de medición "aunque las incertidumbres evaluadas sean pequeñas, esto no garantiza que el error en el resultado de medida sea pequeño, ya que puede haberse pasado por alto algún efecto sistemático no identificado, en la determinación de alguna corrección, o al evaluar el conocimiento incompleto del que se dispone. Por ello, la incertidumbre del resultado de medición no es necesariamente una indicación de la certeza existente de que el resultado de medición se halla próximo al valor del mensurando (o esperado); se trata simplemente de una estimación de la verosimilitud existente acerca de la proximidad al mejor valor, que es consistente con el conocimiento actualmente disponible".

Por lo tanto, se indica que, para los modelos matemáticos utilizados en la representación tanto de la meteorología como de la dispersión de los contaminantes, la incertidumbre radica en la variabilidad y dispersión de los resultados obtenidos respecto a los esperados, cuestión inherente a cualquier modelo debido al conocimiento actualmente existente, por lo que, se debe presentar la incertidumbre para analizar cuánto se aproximan los valores obtenidos a lo deseado, en el entendido de la complejidad de representar con exactitud un comportamiento esperado.

Para efectos de la Guía se indica que la incertidumbre será expresada a través de las diferencias, tanto cualitativas como cuantitativas, entre los datos modelados y observados en el dominio de modelación.

Cada modelo cuenta con su propia incertidumbre⁵⁹, sin embargo, y teniendo presente que el SEIA es un instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo, se indica que solo para el modelo meteorológico es posible presentar un análisis de incertidumbre, ya que para este se cuenta con una data observada de forma tal que se puedan expresar estas diferencias. En contraposición, tanto para la estimación de emisiones atmosféricas como para el modelo de calidad del aire es muy complejo indicar la incertidumbre, ya que no se cuenta con información observada para contrastar las emisiones y concentraciones generadas por el proyecto⁶⁰.

Es imprescindible analizar la incertidumbre del modelo meteorológico para expresar cuán “válida” es la simulación de la dispersión de contaminantes respecto a la información disponible al momento de presentar un proyecto en el SEIA.

Es necesario indicar que, las aseveraciones mencionadas no plantean la necesidad de ponderar la incertidumbre de los modelos meteorológicos en los valores de concentración obtenidos de los modelos de calidad del aire, sino más bien, este análisis debe indicar, de la manera más objetiva posible, cómo es el desempeño del modelo meteorológico para representar el comportamiento de la atmósfera a nivel local o regional. Por tanto, cada desempeño es individual y dependerá de las configuraciones realizadas en el modelo⁶¹.

A continuación, y para el análisis de la incertidumbre del modelo meteorológico se presentan las indicaciones de la obtención de los datos observados y recomendaciones para la validación del modelo meteorológico.

59 Para el caso de la estimación de emisiones atmosféricas la incertidumbre dependerá de la forma de obtención del valor de emisión de las fuentes. Se considerará una incertidumbre mayor para la estimación a partir de factores de emisión o ecuaciones empíricas que de valores medidos en la fuente.

Para el caso del modelo de calidad del aire, se considera que la incertidumbre incorporará tanto la incertidumbre de la forma de estimación de emisiones, del modelo meteorológico como del mismo modelo de dispersión. Esta última, debido a la representación de la realidad a partir de una serie de ecuaciones matemáticas que intentan representar la realidad de la dispersión de los contaminantes y la parametrización de la realidad al modelo.

60 Esto debido a que el proyecto debe ser evaluado antes de su ejecución, según establece el Reglamento del SEIA. En cuanto al modelo meteorológico, es necesario indicar que se utiliza información ya existente en estaciones meteorológicas del dominio de modelación o implementadas por el titular, siendo esta información datada antes del ingreso del proyecto al SEIA.

De todas formas, para el caso de las emisiones, se puede indicar el grado de confiabilidad de las ecuaciones matemáticas utilizadas y parámetros según indica la fuente elegida de factores de emisión. Lo anterior, no es aplicable a mediciones de fuentes existentes, donde solo se debe analizar si las condiciones de operación en la medición serán similares a las utilizadas en el proyecto en evaluación.

61 En este sentido, es importante señalar que este análisis no es ningún juicio sobre la bondad del modelo o su usuario(a), sino solo un reconocimiento de que ningún modelo es capaz de representar la atmósfera en forma exacta.

6.1 Datos meteorológicos observados

Los datos observados corresponden a la información disponible de estaciones instaladas, operativas o que estuvieron en operación y que registren variables meteorológicas de superficie o de altura para la comparativa con los valores modelados. Estos datos pueden ser obtenidos de estaciones instaladas por el titular⁶², debiendo contar con a lo menos un año de monitoreo⁶³. La implementación de una estación meteorológica por parte del titular debe ser evaluada y justificada respecto a la falta de estaciones del área de estudio (véase Figura 11) y la necesidad de una mejor representatividad de los datos meteorológicos observados respecto a otras estaciones existentes.

En el caso de que los datos observados se obtengan de estaciones meteorológicas instaladas por terceros, se recomienda escoger, en la medida de lo posible, la o las estaciones meteorológicas más representativas de la zona donde se ubican las fuentes de emisión y receptores del proyecto para evaluar, de manera objetiva, las variables meteorológicas, tanto de superficie como de altura, respecto del comportamiento de la atmósfera en el área de influencia de calidad del aire. La representatividad radica tanto en la cercanía como en la forma en la cual se comporta las variables meteorológicas en la zona, tal como indica la Figura 11.

Para su elección se recomienda revisar los criterios expuestos en la Figura 11, los cuales indican que se debe escoger según la cercanía y representatividad de la zona donde se encuentren las fuentes de emisión y receptores respecto al área de influencia, según el orden expuesto. Para el caso del segundo punto de validación “Área de Influencia”, se debe evaluar que la estación no se encuentre en una zona del área de influencia que diste del comportamiento previsto para el general de esta superficie, identificando para ello condiciones tales como variaciones de pendiente significativas, barreras físicas consolidadas u otras condiciones que perturben el carácter lineal de los flujos de viento dentro del área de influencia. Esta consideración es válida también para los dos puntos siguientes “Comuna o región” y “Dominio de modelación meteorológica”, ya que lo que se busca es disminuir la incertidumbre asociada a cambios abruptos en la meteorología.

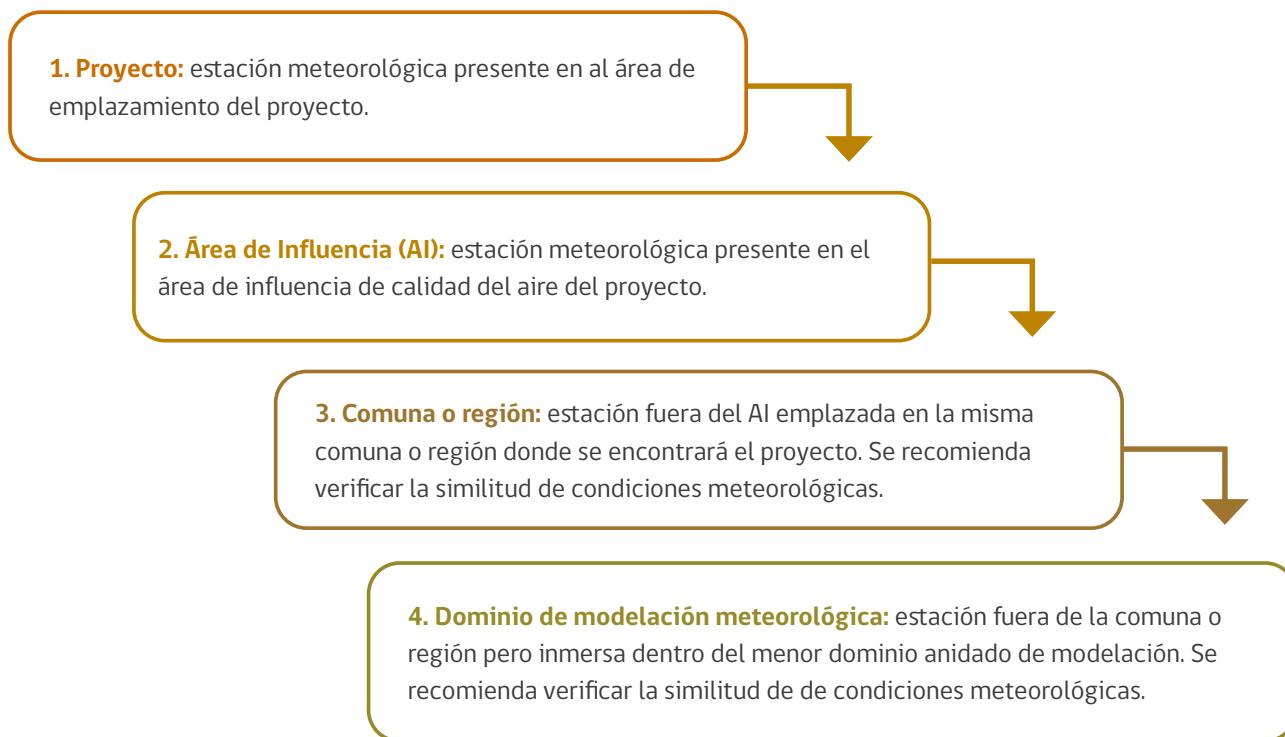
La cantidad de estaciones meteorológicas utilizadas para la comparación de los datos responderá tanto a su disponibilidad o implementación como a una mejor interpretación del comportamiento de la atmósfera en el área de influencia⁶⁴. La cantidad de datos presentes en la(s) estación(es) debe cumplir con los criterios indicados en el numeral 4.3.1 de esta Guía.

62 Debe cumplir con la normativa vigente al momento de su instalación y funcionamiento. De todas formas, lo anterior, no indica la necesidad de que esta información sea parte de normativa ambiental aplicable del proyecto, sino más bien, de que fue instalada cumpliendo con los estándares nacionales.

63 Véase numeral 4.3.2 de la presente Guía.

64 Lo anterior hace referencia a que mientras mayor la cantidad de estaciones en el área de influencia, con una mayor certeza técnica se podrá validar el comportamiento del modelo y, por tanto, los resultados de la calidad del aire contarán con una menor incertidumbre.

Figura 11. Elección de la(s) estación(es) meteorológica(s) para el análisis de incertidumbre



Fuente: elaboración propia

Por lo tanto, se privilegiará los datos observados presentes en el área de influencia de calidad del aire, en caso contrario, se recomienda utilizar estaciones meteorológicas presentes entre el área de influencia y dominio de modelación meteorológico y cuyo emplazamiento presenten similitud en condiciones meteorológicas del área de influencia de calidad del aire⁶⁵. Si el proyecto se encuentra emplazado en el límite regional, se debe sopesar de igual manera el tercer y cuarto criterio (ver Figura 11). Lo anterior, no significa, necesariamente, que el proyecto sea interregional, sino más bien que, el análisis cuantitativo del desempeño del modelo será realizado usando las estaciones meteorológicas de la misma o de la región contigua.

Cabe indicar que, para el uso de estaciones meteorológicas observadas cercanas a los bordes del dominio de modelación numérica de meteorología, se debe tener en cuenta el aumento de la incertidumbre generada en estos puntos, debido al comportamiento de la resolución del modelo⁶⁶.

⁶⁵ Específicamente en las variables que afectan directamente a la dispersión de los contaminantes, tal como uso de suelos, topografía y cualquier otra variables física o espacial que pudiese generar variabilidad en la estación analizada.

⁶⁶ Asociado a la incertidumbre numérica de resolución de las ecuaciones en los bordes del dominio.

6.2 Análisis de validez de los datos

Habiendo escogido la(s) estación(es) con datos observados disponibles, se debe analizar la incertidumbre o validez de los datos modelados, de tal manera de determinar, con el mayor grado posible, si el modelo se ajusta al comportamiento de la atmósfera en su área de influencia. En este sentido, el análisis debe ser tanto cualitativo como cuantitativo, ya que ambos son complementarios⁶⁷.

6.2.1 Análisis cualitativo

El análisis cualitativo permite, de manera más ágil y eficiente, visualizar el comportamiento de la atmósfera presentado por el modelo respecto al observado. Para esta comparación, se deben presentar los gráficos indicados en los numerales 5.6 y 5.7 de esta Guía.

En base a la comparación de los ciclos diarios, estacionales y anuales de las variables meteorológicas observadas y simuladas, en idéntica posición, se debe caracterizar la capacidad del modelo de reproducir las observaciones, tanto en variabilidad como magnitud, y analizar el efecto sobre la dispersión de los contaminantes y en la proyección de las concentraciones sobre los receptores, pudiendo sobre o subestimar los resultados. Se debe considerar toda la información disponible para el análisis, debiendo ser lo más completo, riguroso y objetivo.

De las variables de meteorología observadas en superficie, como mínimo, se debe presentar el análisis cualitativo de las siguientes:

- Velocidad y dirección del viento
- Temperatura
- Humedad absoluta o relativa
- Precipitación

Las restantes variables meteorológicas deben analizarse sobre la base de las particularidades del proyecto, el área de influencia y los efectos sobre los receptores.

Para el caso de la meteorología en altura, una de las principales incertidumbres en el desempeño del modelo, en el contexto de la dispersión de contaminantes, es la representación de la altura de la capa de mezcla. Como primera aproximación, cualquier desviación en la modelación de esta variable se propaga de manera inversa a las concentraciones de los contaminantes, es decir, **una sobreestimación de la altura de la capa de mezcla contribuiría a una subestimación de las concentraciones y viceversa**. De esta forma, el análisis de esta variable es de suma importancia para el volumen de dispersión de los contaminantes, por lo que, y en caso de que esté disponible la información observada de la meteorología en altura o se haga necesaria para disminuir la incertidumbre asociada, este análisis debe ser presentado con el mayor detalle posible.

⁶⁷ Un mayor nivel de detalle será requerido en función de la magnitud, duración y extensión de los impactos generados por la dispersión de contaminantes en la atmósfera.

6.2.2 Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo se debe realizar calculando como mínimo las métricas estadísticas del sesgo (error medio o *BIAS*⁶⁸), error absoluto medio (*MAE*⁶⁹) y la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*⁷⁰), cuyas ecuaciones se presentan a continuación.

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (1)^{71}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (2)^{72}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (3)$$

Donde:

n: Cantidad de datos

S: Valores obtenidos del modelo

O: Valores observados en estaciones meteorológicas

Tanto *BIAS* como *MAE* son estimadores de la diferencia entre el valor modelado y observado de un mismo fenómeno, en este caso meteorológico. De igual forma, *RMSE* es un estimador de la frecuencia de las diferencias entre los valores observados y modelados, siendo especialmente sensible a los valores atípicos, por lo tanto, a mayor diferencia entre estos valores menor será el grado de ajuste de este estadístico⁷³.

6.

A su vez, a las métricas señaladas se recomienda incorporar el coeficiente de correlación⁷⁴ (*r*), que corresponde a una medida de la correlación lineal entre dos conjuntos de variables, siendo para este caso, los valores modelados y observados.

⁶⁸ Por su traducción al inglés.

⁶⁹ Por sus siglas en inglés; "Mean absolute error".

⁷⁰ Por sus siglas en inglés; "Root mean square error".

⁷¹ Su rango comprende a todos los números reales, incluyendo el cero.

⁷² Su rango comprende a todos los números reales mayores e iguales a cero.

⁷³ Hyndman, R. J. & Koehler, A. B., 2006.

⁷⁴ Su rango de valores comprende desde -1 hasta +1, incluyendo el cero. El cero corresponde a una nula correlación lineal.

Las variables meteorológicas que deben, como mínimo, presentar estas métricas estadísticas corresponden a la temperatura y velocidad del viento⁷⁵, las cuales, y en el marco del SEIA, serán consideradas como la base para analizar la incertidumbre cuantitativa del modelo para representar la atmósfera en el área de influencia. De todas formas, y en caso de ser necesario, se podrán presentar las métricas de otras variables meteorológicas, ya sean de superficie o de altura, para un mejor entendimiento y caracterización de la incertidumbre. Es importante que esta comparación cuantitativa no solo se realice para la situación promedio, sino que también para situaciones desfavorables para la dispersión.

En la Tabla 2 se presenta una recomendación de valores medios esperables para las métricas estadísticas de las variables velocidad del viento, medida a 10 metros sobre el suelo, y temperatura, medida a 2 metros sobre el suelo, a lo largo del territorio nacional. Estos parámetros han considerado la recopilación de distintas modelaciones a nivel nacional y recomendaciones a nivel internacional, y plasman las dificultades de representar las condiciones meteorológicas a lo largo del territorio chileno. No excluyen que se presenten otros estadísticos que reflejen las diferencias entre lo observado y modelado.

Tabla 2. Métricas estadísticas recomendables en el análisis de incertidumbre para las variables meteorológicas medias⁷⁶

| ESTADÍSTICO | VELOCIDAD DEL VIENTO (10 METROS) | TEMPERATURA (2 METROS) |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| Bias | [-2,5;2,5] (m/s) | [-4;4] (°C) |
| MAE | ≤3 (m/s) | ≤4 (°C) |
| RMSE | ≤3,5 (m/s) | ≤ 4,5 (°C) |
| Coeficiente de correlación (r) | >0,6 | >0,8 |

Fuente: elaboración propia

En conclusión, el análisis cuantitativo como cualitativo debe presentarse de la manera más objetiva posible, entregando un grado de confianza necesario para la mejor interpretación de la dispersión de los contaminantes en el área de estudio.

⁷⁵ Como su componente horizontal.

⁷⁶ Estos valores solo referencian a las situaciones promedio durante el período de modelación y no a situaciones puntuales críticas o desfavorables para la dispersión.

7. CONCLUSIONES DEL INFORME DE MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE





7. CONCLUSIONES DEL INFORME DE MODELACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE

Las conclusiones del informe de modelación deben ser consistentes con los resultados de la modelación meteorológica y de calidad del aire, como también con el análisis de la incertidumbre asociada.

Considerando que existen fenómenos atmosféricos que contribuyen a acrecentar la dispersión de contaminantes, mientras que otros la reducen, y a la luz de los procesos que se presentan en el área de influencia, a la capacidad del modelo utilizado para abordar dichos procesos o fenómenos, y al análisis de incertidumbre efectuado, se debe indicar, de acuerdo con el juicio experto, si se considera que la modelación sobreestima o subestima las concentraciones ambientales.

Se recomienda indicar el o la profesional responsable de la modelación, quien debiera firmar el informe de modelación. Es importante señalar que, así como en la evaluación de cualquier otro componente ambiental, el responsable técnico debe ser un profesional con experiencia comprobable en la materia. En este caso, es necesario conocimiento en meteorología y contaminación atmosférica, por cuanto se requiere del ejercicio de criterio y juicio experto, así como de interpretación de resultados.

8. OTRAS CONSIDERACIONES





8. OTRAS CONSIDERACIONES

Si bien no es el objetivo de esta Guía abordar en profundidad los aspectos relacionados con la caracterización de la calidad del aire (o concentraciones observadas), a continuación se presentan algunos criterios básicos que deben ser considerados de manera previa al ingreso del proyecto al SEIA.

8.1 Caracterización de la calidad del aire

La calidad del aire medida u observada corresponde a los registros obtenidos de estaciones monitores emplazadas en zonas **que representen la calidad del aire de los receptores de interés del área de influencia respectiva del proyecto en evaluación**. Estos registros consideran el aporte a la concentración ambiental de contaminantes de todas las fuentes de emisión en operación al momento de efectuar las mediciones, incluyendo las naturales.

Evidentemente, estas mediciones no incluyen el aporte estimado de aquellos proyectos que, teniendo RCA favorable no se encuentran en ejecución al momento de la medición o se encuentran parcialmente ejecutados (por ejemplo, proyecto por etapas). **El análisis de la acumulación de los impactos en el área de influencia del proyecto debe evaluarse caso a caso**, distinguiéndose entre la concentración “medida” y la concentración proveniente del aporte de “otros proyectos”.

De todas formas, siempre que sea posible, se debe considerar en el aporte de “otros proyectos” aquellos que coincidan en el área de influencia de calidad del aire y temporalidad del proyecto en evaluación, además que presenten los antecedentes de modelación de calidad del aire

para estos análisis, siendo requisito que sus procesos de calificación ambiental hayan sido considerados favorables. Para el caso de aquellos proyectos que estén en evaluación ambiental, se recomienda que puedan ser considerados en el aporte de "otros proyectos".

Todas las mediciones de calidad del aire deben siempre ser acompañadas por mediciones meteorológicas (viento, temperatura, presión, humedad relativa, radiación global y precipitación, entre otras) en la misma ubicación y durante el mismo periodo, de modo de poder analizar las variaciones de las concentraciones de contaminantes en función de la meteorología.

8.1.1 Representatividad de las mediciones de calidad del aire

La representatividad de una estación de monitoreo de calidad del aire corresponde a la determinación del área en la cual los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos registrados se podrán asimilar al valor de cualquier ubicación, distinta a la estación, dentro de esa área. Esta asimilación se realiza debido a varias razones, entre ellas se destaca que las concentraciones medidas sean generadas por las mismas fuentes de emisión o similares y que los procesos de dispersión, formación y transporte de los contaminantes estén interconectados en el área de las fuentes de emisión⁷⁷.

Las mediciones de calidad del aire para la descripción de su área de influencia deben ser obtenidas de estaciones de monitoreo representativas⁷⁸ de los receptores de interés, tal como se planteó en la caracterización de la calidad del aire (numeral 8.1 de esta Guía).

El área de representatividad de una estación para contaminantes primarios depende fuertemente de las características particulares de su lugar de emplazamiento, lo que no es necesariamente cierto para contaminantes secundarios como el ozono.

La localización de las estaciones de monitoreo debe definirse sobre la base del criterio experto, pudiendo considerarse en forma conjunta con visitas a terreno, resultados de simulaciones de cuatro semanas de duración (dos durante enero y dos durante julio) de los modelos a usar en la evaluación del proyecto, la presencia de población, ecosistemas vulnerables, zonas en estado de latencia o saturación, resoluciones de representatividad de las estaciones de monitoreo entre otros aspectos relevantes del caso particular. Lo antes mencionado, debe ser justificado de manera previa al ingreso del proyecto al SEIA.

La autoridad competente será quien establezca en el proceso de evaluación ambiental si los datos observados de calidad del aire utilizados son los más adecuados en cada caso.

⁷⁷ Definición en base a Spangl. W. et al. 2007.

⁷⁸ Cabe indicar que, esta representatividad debe ser entendido según los preceptos estipulados en el numeral 3.1 de la guía "Calidad del Aire en el Área de Influencia de Proyectos que ingresan al SEIA" (SEA, 2015). Lo anterior, es relevante para aquellas estaciones que no cuenten con resolución de representatividad poblacional o de algún otro objeto de protección.

8.1.2 Periodo de mediciones de calidad del aire

La información de calidad del aire debe considerar los valores absolutos y validados de a lo menos un año de mediciones, considerando periodo y unidad de medida del contaminante según su norma de calidad específica. Si se dispone de más de un año, se debe tomar el valor del año cuyas condiciones sean más desfavorables, para lo cual se debe analizar la variabilidad de un periodo de un máximo de tres años, en consecución con lo indicado en el numeral 4.3.1 de esta Guía. La variabilidad muestra cuán representativo es el año escogido de mediciones. La cantidad de información dependerá también de los límites permisibles de cada contaminante analizado según norma de calidad ambiental respectiva según el objeto de protección; los valores antes indicados son los mínimos requeridos.

En caso de que no existan estaciones con la completitud necesaria o las existentes no se ubiquen en los puntos requeridos para la evaluación de impacto (representatividad del área de influencia), será responsabilidad del titular levantar información de calidad del aire previo al ingreso del proyecto al SEIA. En esta línea, incluso pudiese contarse con un periodo de registro el cual debe considerar como mínimo de 6 meses, siempre y cuando se verifique la condición más desfavorable para la dispersión atmosférica, justificada en base a la condición meteorológica local⁷⁹. Dicha información debe tener la temporalidad suficiente como para caracterizar las distintas condiciones de dispersión en la zona del proyecto, incluyendo siempre los periodos críticos, de manera de incluir la potencial variabilidad natural de la zona analizada.

La autoridad competente será quien valide la información de calidad del aire en cada caso.

⁷⁹ La cantidad de datos observados o monitoreados debe ser entendido según los preceptos estipulados en el numeral 3.2 de la guía "Calidad del Aire en el Área de Influencia de Proyectos que ingresan al SEIA" (SEA, 2015).

ANEXOS





ANEXO I.

FUNDAMENTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Los modelos de calidad del aire son una herramienta importante dentro de la evaluación ambiental. La complejidad de estos modelos ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, apuntando a incorporar cada vez más procesos atmosféricos en sus códigos computacionales, hasta el punto de que los modelos más avanzados hoy en día se pueden considerar completos, en el sentido que cuentan con módulos sofisticados para todos los procesos físicos y químicos relevantes en la atmósfera. Como consecuencia, estos modelos más complejos traen consigo un mayor desafío en la interpretación de sus resultados ya que representan de cierto modo cada uno de los procesos considerados y sus respectivas interacciones. En este sentido, y dentro del contexto de la evaluación ambiental, tanto el usuario de un modelo como el lector de un Estudio o Declaración de Impacto Ambiental deben conocer los fundamentos de estos procesos. El presente texto está pensado justamente para consultores y evaluadores, ya que describe los procesos fundamentales en forma cualitativa, buscando ayudar al lector a una mejor interpretación de los resultados de un modelo de calidad del aire.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Estructura vertical de la atmósfera

El aire que compone la atmósfera está constituido mayoritariamente por moléculas de nitrógeno (78%) y de oxígeno (21%). Si bien, los demás compuestos presentes en la atmósfera en cantidad pueden ser considerados menores o de tipo traza, ellos tienen en muchos casos gran importancia desde el punto de vista radiativo (por ejemplo; H_2O , CO_2), químico (H_2O , ion hidroxilo - OH) o energético (H_2O , O_3). Aunque la densidad del aire disminuye rápidamente con la altura, la proporción entre sus dos componentes mayores se mantiene aproximadamente constante hasta unos 100 km de altitud. Desde el punto de vista meteorológico, sin embargo, el mayor interés se concentra usualmente en las capas de la atmósfera más cercanas a la superficie, distinguiéndose estas en función de la variación de la temperatura media con la altura (Figura 12).

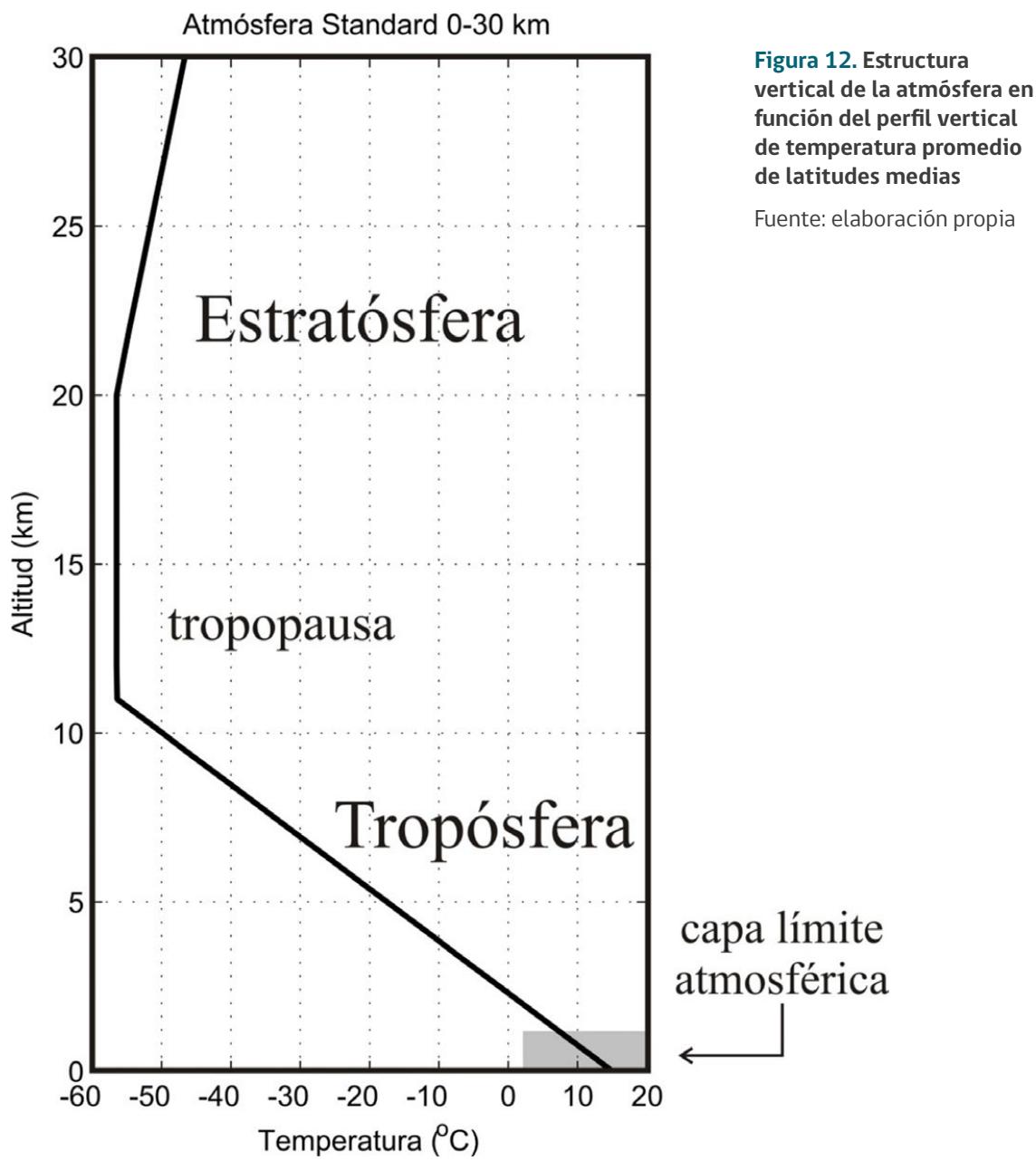
La capa meteorológicamente más importante es la tropósfera, que corresponde a los primeros 10 a 20 km sobre el nivel del mar, en la cual la temperatura media disminuye con la altura a una tasa de 6.5 (K/km). Si bien, la tropósfera contiene aproximadamente un 80% de la masa total de la atmósfera, su espesor es relativamente delgado en comparación con el radio terrestre de aproximadamente 6.370 km. Aun así, es en la tropósfera donde se desarrollan los fenómenos meteorológicos más importantes, como los sistemas frontales de latitudes medias o los huracanes de la zona tropical, y es en la tropósfera donde se encuentra la casi totalidad del agua atmosférica en forma gaseosa (vapor), líquida (gotas de nubes y de lluvia) o sólida (cristales de hielo, nieve, granizo).

Por encima de la tropósfera se encuentra la estratosfera, caracterizada por un aumento de la temperatura media con la altura. La estratosfera es relativamente rica en ozono, compuesto que al absorber la radiación ultravioleta proveniente del Sol es responsable del aumento de la temperatura con la altura en esta capa.

Dentro de la tropósfera, es importante distinguir la capa más cercana al suelo, denominada **Capa Límite Atmosférica** (CLA). Las propiedades de esta capa son fundamentales para la mayor parte de los problemas de calidad del aire, puesto que los contaminantes atmosféricos son emitidos normalmente en el interior de la CLA y, por lo tanto, son afectados de manera directa por su dinámica. En la CLA los contaminantes se mezclan en forma relativamente rápida y son transportados por los vientos cercanos a la superficie. La altura o espesor de la CLA cambia rápidamente en el tiempo, mostrando un ciclo diario muy pronunciado, que a su vez depende de la estación del año. Por ejemplo, en horas de la tarde durante el verano, la altura de la CLA en Santiago puede sobrepasar los 1.000 metros sobre el nivel del suelo, mientras que en una tarde de invierno no supera los 200 metros. El espesor de la CLA y los vientos en su interior controlan fuertemente el impacto de los contaminantes atmosféricos

y, por lo tanto, la descripción de cómo varía ella en el tiempo y en el espacio es fundamental en problemas de calidad del aire. Algunas de las características principales de la capa límite atmosférica serán descritas más adelante.

En la Figura 12 se muestran sólo las dos capas más bajas de la atmósfera: tropósfera y estratosfera. La zona indicada como capa límite atmosférica tiene temperaturas y alturas variables a lo largo del día.



1.2 Escalas de variabilidad

El impacto en la calidad del aire producido por una fuente emisora de contaminantes atmosféricos es variable en el espacio (existiendo zonas que reciben un mayor o menor impacto) y en el tiempo (existiendo períodos de mayor o menor impacto). Aun cuando las emisiones fuesen constantes en el tiempo, esta variabilidad igual se observaría pues ella es, en gran medida, consecuencia de los factores meteorológicos que median la relación entre emisiones y concentraciones de los contaminantes atmosféricos.

Debido a que la variabilidad meteorológica ocurre en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales, es conveniente asignar a estas denominaciones, las cuales se describen en la Tabla 3. Tal como ilustra la Figura 13, las escalas temporales y espaciales de variabilidad meteorológica están en general asociadas. Las escalas más grandes están relacionadas con fenómenos climáticos, cuyas escalas de tiempo son de varios años y su alcance espacial es global. Los fenómenos meteorológicos del tiempo (por ejemplo, paso de sistema frontal) caen en el rango de la denominada escala sinóptica, que tiene escalas de tiempo de entre 1 y 10 días, y abarca extensiones espaciales del orden de los 1.000 kilómetros. Los problemas de contaminación atmosférica más comunes tienen por lo general escalas de tiempo y espacio menores, denominadas mesoescala y microescala.

Si bien la separación de escalas mencionada tiene utilidad conceptual, se debe tener presente que los fenómenos de distintas escalas interactúan entre sí. Por ejemplo, la altura de la capa límite atmosférica, que tiene una variabilidad principalmente de escala horaria, percibe una influencia de la escala sinóptica a través de las condiciones de estabilidad de la tropósfera baja, de tal manera que la máxima altura que la CLA alcanza puede ser muy distinta en días sucesivos. Desde el punto de vista de contaminación atmosférica, la identificación de las escalas espaciales y temporales más relevantes al problema específico que se aborda tiene importancia en cuanto a:

- **Estimar el alcance del impacto.** La extensión espacial del impacto de las emisiones de un contaminante atmosférico depende de la relación entre el tiempo medio de residencia del contaminante en la atmósfera y los tiempos de mezcla entre distintas regiones de la atmósfera. Por ejemplo, los CFC⁸⁰ son compuestos muy estables, que tienen tiempos de residencia en la atmósfera de cientos de años. Debido a este tiempo de residencia tan alto, estos compuestos han sido capaces de extenderse por toda la tropósfera e incluso llegar a la estratosfera, donde han sido causa principal de la disminución del ozono estratosférico. Las emisiones de SO₂, en cambio, tienen tiempos de residencia de algunos días, lo que implica que su impacto es más bien local o en las zonas cercanas a los puntos emisores.
- **Definir la variabilidad más importante en función del periodo establecido por las normas de calidad.** Así, si el problema en estudio se refiere al cumplimiento de una norma establecida para promedios horarios de concentraciones, el análisis se centrará

⁸⁰ Clorofluorocarburos.

en la variabilidad de menor escala de las condiciones meteorológicas (por ejemplo, ciclo diario); para una norma de promedio diario la variabilidad sinóptica será central, mientras que el cumplimiento de la norma anual requerirá atención de la variabilidad interanual de las condiciones meteorológicas.

- **Definir el tipo de mediciones que serán necesarias para describir el problema.** El ejemplo más común en este caso es el error de intentar utilizar datos de estaciones de la red meteorológica sinóptica nacional con el objeto de estudiar problemas de contaminación atmosférica de mesoescala o microescala. En este caso surgirán problemas inmediatamente, ya que ni la resolución temporal de los datos sinópticos, ni la ubicación espacial de estas estaciones son apropiadas para describir un problema de escala menor.
- **Definir las herramientas de modelación más apropiadas para simular numéricamente el problema.** De este modo, existen modelos globales, modelos de mesoescala, o modelos turbulentos, según sean las escalas que cada modelo describe en mejor forma.

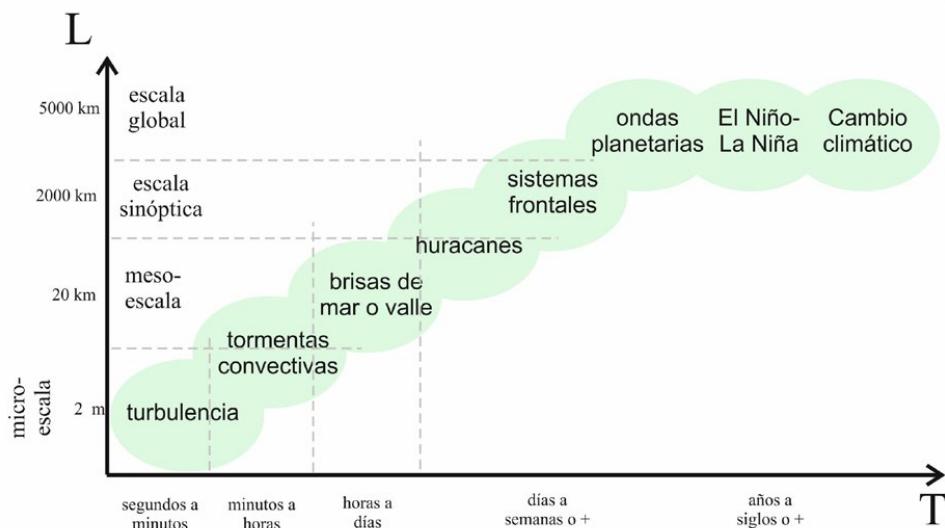
Tabla 3. Escalas de variabilidad meteorológica

| VARIABILIDAD | DESCRIPCIÓN |
|-------------------------------------|---|
| VARIABILIDAD TEMPORAL | |
| Interanual o de largo plazo | Variabilidad a lo largo de los años. Puede asociarse a variabilidad tipo ENSO, inter-decadal o a tendencias de largo plazo (cambio climático). |
| Estacional | Variabilidad en los distintos meses de un año, especialmente relacionada con las estaciones del año, cambios en la temperatura del mar y movimientos del sistema del Anticiclón del Pacífico. |
| Intra-estacional | Entre la escala estacional y sinóptica, puede determinar la modulación de esta última. |
| Sinólica | Variación en escalas de entre 1 y 10 días, especialmente asociada a la migración hacia el este de perturbaciones de presión en latitudes medias y altas. |
| Sub-sinólica o de mesoescala | Variabilidad entre algunas horas y 1 día asociada a fenómenos de escala regional. Propagación de fenómenos como baja costera y efectos de terreno complejo caen en esta escala. |
| Horaria o de ciclo diario | Describe la variabilidad típica a lo largo del día, siendo importante la distinción entre las fases diurna y nocturna. |

| VARIABILIDAD | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------------|--|
| VARIABILIDAD TEMPORAL | |
| Subhoraria o turbulenta | Causada principalmente por la turbulencia atmosférica, ondas de gravedad, etc. |
| VARIABILIDAD ESPACIAL | |
| Global o planetaria | Abarca todo el planeta: fenómeno de cambio climático, capa de ozono estratosférico, oscilaciones naturales de la atmósfera/océano, ondas planetarias, etc. |
| Sinóptica | Con escalas horizontales de miles de kilómetros y que abarcan la tropósfera completa: sistemas de depresiones de latitudes medias. |
| Mesoescala | Con escalas horizontales de decenas a cientos de kilómetros: circulaciones forzadas por la topografía y contrastes de mar/tierra. |
| Microescala | Con escalas desde la más fina variabilidad turbulenta hasta algunos kilómetros: turbulencia, flujos urbanos, capa límite atmosférica, etc. |

Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Escalas espaciales horizontales (L) y escalas de tiempo (T) asociadas a distintos fenómenos meteorológicos y climáticos.



Fuente: adaptado de Ahrens, 2009.

1.3 Factores meteorológicos básicos de la contaminación atmosférica

La meteorología afecta de muchas maneras la relación entre las emisiones y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos. Entre los factores meteorológicos más importantes a este respecto podemos señalar el factor energético que determina la cantidad de energía disponible tanto para la fotoquímica de los contaminantes como para su dispersión, el factor de transporte asociado al movimiento de los contaminantes con el viento, y el factor de dispersión asociado a la dilución de los contaminantes debida a la turbulencia atmosférica. Si bien, estos factores son los principales que afectan el impacto de una fuente contaminante, no son los únicos. Efectos fisicoquímicos como la remoción de contaminantes por la precipitación, la sedimentación y el arrastre del material particulado, la deposición seca de algunos gases en superficie, la participación de gotas de nubes en procesos químicos heterogéneos, entre otros, son también procesos en que los factores meteorológicos juegan un papel importante y que deben ser modelados o considerados en los problemas que así lo requieran. Sin embargo, a diferencia de los tres factores mencionados más arriba, los cuales importan en todo problema de evaluación de impacto de contaminación atmosférica, estos procesos fisicoquímicos son de importancia en casos particulares y serán dejados fuera del alcance del presente texto.

El factor energético comprende, en primer lugar, los procesos de transferencia radiativa que controlan la cantidad de radiación solar que atraviesa la atmósfera y que finalmente llega a la superficie, así como aquellos que definen cuánta radiación de onda larga es emitida y absorbida por la superficie y las capas atmosféricas adyacentes. En los casos de contaminación fotoquímica (por ejemplo, ozono troposférico) esta información es de utilidad directa ya que determina las velocidades de las reacciones que participan en el problema. En segundo lugar, el factor energético se refiere al balance de energía superficial, el cual controla de manera importante las condiciones de estabilidad y los niveles de turbulencia en la capa límite atmosférica. En el numeral 2 del presente Anexo se mostrarán algunos conceptos básicos de transferencia radiativa y del balance de energía superficial.

El factor de transporte de los contaminantes por el viento está asociado a la circulación atmosférica en las capas bajas de la tropósfera. En particular, la dirección del viento determina los lugares de impacto de las emisiones de contaminantes, mientras que la velocidad del viento determina el alcance que tendrán las emisiones y el grado de dilución inicial de estas. La velocidad y dirección del viento son variables que cambian en el espacio y en el tiempo, forzadas por la topografía, el balance de energía superficial, los gradientes de presión de escala sinóptica y sub-sinóptica, entre otras variables. Algunos de estos factores de la circulación serán descritos en el numeral 3 del presente Anexo.

El principal mecanismo por el cual los contaminantes en el aire son dispersados verticalmente es debido a la turbulencia atmosférica. La intensidad de la turbulencia en la capa límite depende tanto de la magnitud del viento como de las condiciones de estabilidad atmosférica, según se describirá en el numeral 4 del presente Anexo.



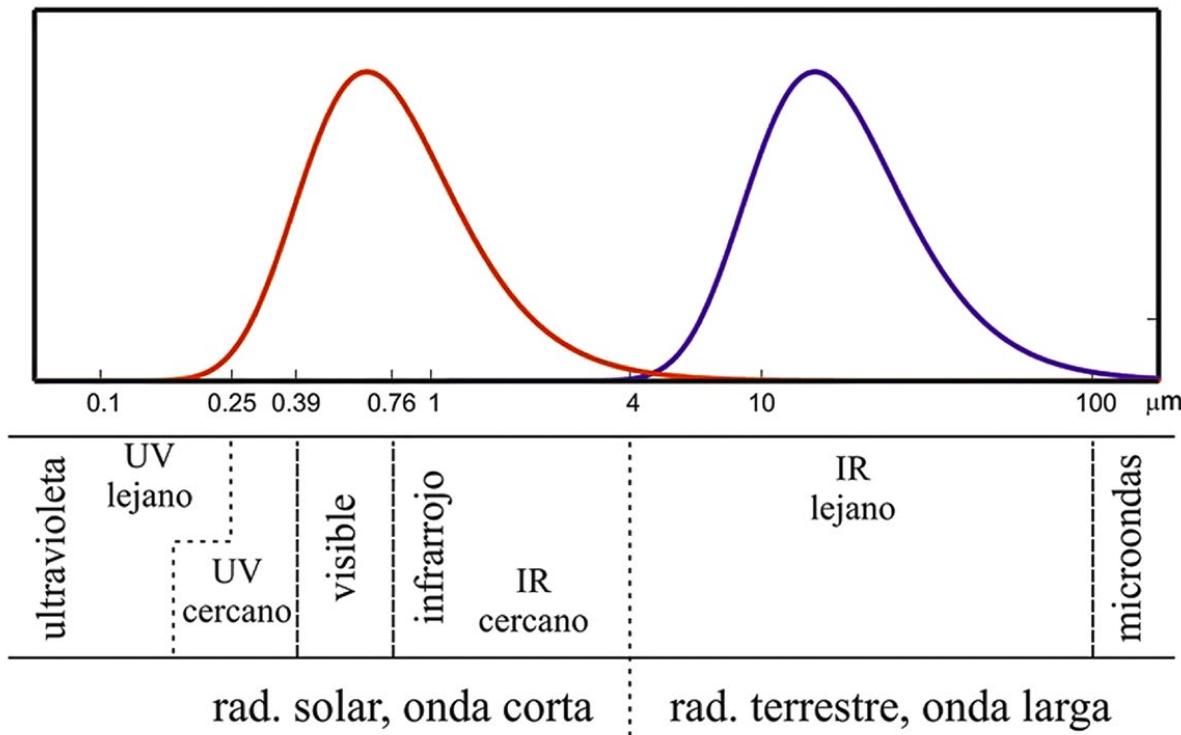
2. FACTOR ENERGÉTICO

2.1 Transferencia radiativa

De entre las tres formas básicas en que la energía se transporta, la radiación electromagnética es la única que no requiere un medio material para hacerlo. Por esta razón, ella es la única forma en que la Tierra recibe energía desde el Sol, siendo esta la fuente primaria de energía que produce el movimiento de la atmósfera. Como se dijo antes, en problemas como la contaminación atmosférica fotoquímica, la cantidad de radiación solar disponible afecta directamente las tasas de producción de los contaminantes de interés. En el caso más general, sin embargo, la radiación que llega a la superficie es parte fundamental del balance de energía superficial, y, por esta vía, afecta las condiciones de estabilidad y los niveles de turbulencia de la capa límite atmosférica.

Una característica básica en la radiación electromagnética es que puede considerarse que se propaga en forma de ondas, pudiendo estas tener una amplia escala de longitudes de onda, conformando el llamado espectro electromagnético. La forma en que la materia interactúa con la radiación electromagnética depende mucho de la longitud de onda de la radiación, ocurriendo casos en que, por ejemplo, un mismo gas es completamente transparente a la radiación de cierta longitud de onda, mientras que para radiación de otra longitud de onda el mismo gas es completamente opaco. La Figura 14 ilustra la región del espectro electromagnético más importante en meteorología, indicando los nombres con que se designan sus distintos sub-rangos.

Figura 14. Esquema del espectro electromagnético en su parte más relevante para meteorología y clima. La curva roja ilustra la distribución de la energía emitida por un cuerpo negro ideal a temperatura de 5.780 K en función de la longitud de onda, mientras que la curva azul lo hace para un cuerpo a temperatura de 255 K (eje X en unidades de μm).



Fuente: elaboración propia

En la Figura 14 se observa que las magnitudes de ambas curvas no son comparables ya que se normalizaron por el máximo de cada una (un cuerpo negro a 5.780 K emite mucha más radiación que uno a 255 K). En la parte inferior del gráfico se indica los nombres que reciben distintas franjas de la radiación electromagnética en el rango mostrado.

Dado un cierto objeto material (por ejemplo, una parcela de aire, un cierto gas, una capa de la atmósfera, un pedazo de superficie, entre otros), interesan dos cosas principales en relación con la radiación electromagnética: 1) cuánta radiación el objeto emite y en qué longitudes de onda y, 2) cómo interactúa este con la radiación que recibe. En este último caso las posibilidades son que la radiación sea absorbida, dispersada o simplemente transmitida.

En cuanto al problema de emisión, podemos decir que tanto la cantidad de radiación que un objeto emite, así como el rango principal de longitudes de onda en que lo hace, dependen

en primer lugar de su temperatura. A mayor temperatura del objeto su tasa de emisión de radiación electromagnética aumenta, y el máximo de radiación se concentra en longitudes de onda más pequeñas. Así pues, las capas exteriores del Sol se encuentran a temperaturas del orden del 6.000 K, de tal manera que la mayor cantidad de radiación que recibimos del Sol ocurre en el rango de longitudes de onda denominado rango visible (Figura 14). Cuerpos materiales a temperaturas parecidas a las de la superficie de la Tierra (~ 300 K), en cambio, emiten radiación principalmente en longitudes de onda en el rango infrarrojo del espectro. En problemas de meteorología y clima se denomina radiación solar o de onda corta la región del espectro dominada por la radiación proveniente del Sol, y radiación de onda larga o terrestre aquella dominada por la emisión de la superficie terrestre o la atmósfera (Figura 14).

A parte de su temperatura, la emisión de un objeto depende también de sus características propias, como composición, estructura molecular, estado o fase en que se encuentra, etc. Esto se caracteriza mediante la propiedad llamada emisividad, que representa la fracción de emisión que el cuerpo tiene respecto del máximo teórico que podría tener a la temperatura considerada, este último denominado radiación de cuerpo negro. Como buena propiedad radiativa, la emisividad de los objetos puede cambiar fuertemente con la longitud de onda. En el rango infrarrojo los distintos gases que componen la atmósfera tienen emisividades muy distintas: mientras el oxígeno y nitrógeno moleculares casi no emiten radiación, las trazas de vapor de agua y CO₂ presentes en la atmósfera tienen una alta emisividad. En cuanto a las superficies, todas aquellas de carácter natural, como superficies de agua, tierra o vegetación, tienen en general una muy alta emisividad en el rango infrarrojo del espectro.

En relación con la interacción de la materia con la radiación recibida, nuevamente conviene distinguir entre la radiación de onda corta y de onda larga. En condiciones de cielos despejados la radiación solar atraviesa la atmósfera con muy poca absorción. Aunque las moléculas del aire y los aerosoles presentes en la columna atmosférica causan dispersión, la mayor parte de la radiación solar llega directamente a la superficie. Esta absorbe buena parte de la radiación recibida, y refleja una fracción, denominada albedo superficial. La presencia de nubosidad en la columna atmosférica hace que una alta fracción de la radiación solar sea reflejada por las nubes hacia el espacio exterior (según sea el albedo de las nubes, el cual depende del tipo de nube, su espesor, configuración geométrica, etc.) y, en consecuencia, la superficie recibe una menor cantidad de energía.

En el rango de onda larga, por su parte, los mismos compuestos traza activos en la emisión en esta región del espectro, absorben con alta eficiencia la radiación infrarroja que reciben. Cumplen estos un rol de efecto invernadero natural de gran importancia, ya que de no existir ellos en la atmósfera, la radiación infrarroja emitida por la superficie atravesaría sin absorción la atmósfera hacia el espacio exterior y la temperatura media superficial sería mucho menor a la actual. Con la presencia de gases activos en el infrarrojo (gases invernadero, especialmente el vapor de agua), en cambio, buena parte de la emisión infrarroja superficial es absorbida por ellos en la atmósfera y, gracias a la fracción de su emisión infrarroja que llega a la superficie, la temperatura media de esta última es mucho más benigna que en el caso hipotético en que

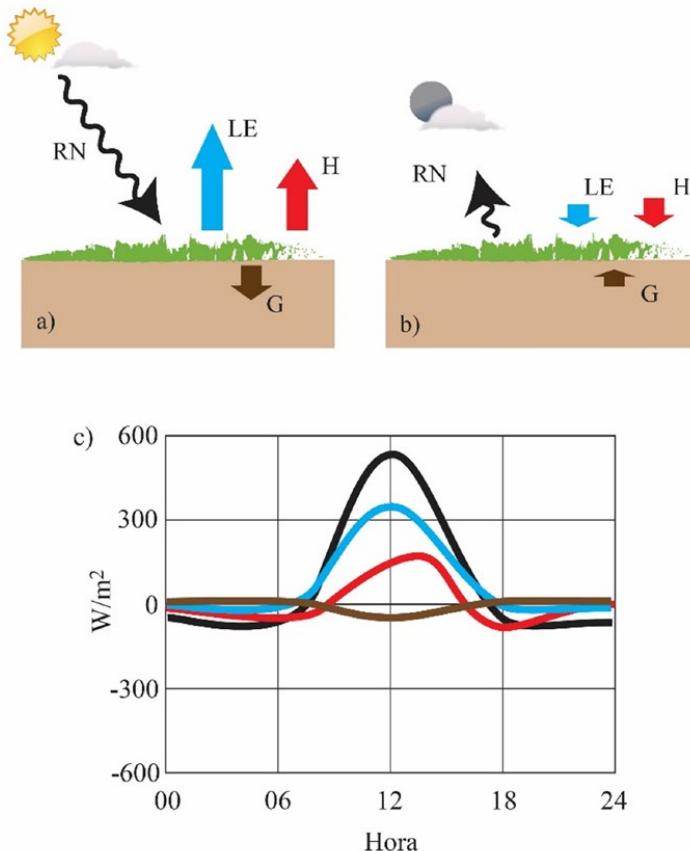
los gases invernadero naturales no existiesen en la atmósfera. Más allá de este impacto en el clima global, este mismo efecto hace que el enfriamiento nocturno superficial, la intensidad de la inversión nocturna de superficie, la estabilidad superficial y, por consiguiente, la intensidad de la turbulencia nocturna dependa en parte de la mayor o menor humedad presente en la columna atmosférica cercana al suelo (ver definición de estos conceptos más adelante). Una atmósfera muy seca, sin presencia de nubes, producirá inversiones superficiales nocturnas más intensas. Por el contrario, una atmósfera con mayor contenido de humedad puede limitar el enfriamiento superficial nocturno. Por último, dada la alta emisividad infrarroja del agua en su fase líquida, la presencia de nubes, incluso las de mayor altura, puede restringir aún más el enfriamiento nocturno en superficie.

2.2 Balance de energía superficial

Como veremos más adelante, las condiciones de estabilidad cerca del suelo dependen mucho de la temperatura de la superficie, y de su comparación con la temperatura de la capa de aire sobre ella. El balance de energía superficial (BES) determina la variación de la temperatura superficial, y establece el nexo entre los flujos de radiación que llegan a la superficie y las condiciones de estabilidad y turbulencia en la CLA.

La Figura 15 muestra un esquema idealizado del balance de energía de una superficie simple. Componentes principales del BES son los flujos de energía radiativa que llegan o salen de la superficie. Durante condiciones diurnas el flujo radiativo dominante es el de la radiación solar incidente en superficie. El albedo superficial determina la fracción de la radiación solar que se refleja, mientras que la radiación de onda larga neta que llega a la superficie será comparativamente menor. Durante la noche, en cambio, la radiación solar es nula, por lo que la radiación terrestre pasa a ser el término radiativo dominante del BES, el cual impone típicamente un efecto de enfriamiento neto para la superficie (dependiendo de la humedad atmosférica y de la presencia de nubes como se ha dicho antes).

Figura 15. Balance de energía superficial.



Fuente: adaptada de Wallace y Hobbs, 2006.

En las imágenes superiores de la Figura 14 se muestra partición típica de los flujos de energía que participan del balance de energía de una superficie terrestre con vegetación simple. a) Condición diurna. b) Condición nocturna. RN: radiación neta; H: calor sensible; LE: calor latente de evaporación; G: flujo de calor al subsuelo. c) Ciclos diarios idealizados de los términos del balance de energía superficial: radiación neta (negro), calor sensible (rojo), calor latente (azul), calor al subsuelo (café).

La radiación neta que llega a la superficie se ocupa en ella en distintas formas. Parte de esa energía calienta el suelo, parte es transferida al aire en contacto con el suelo, y parte se ocupa en evaporar agua que pudiere haber en la superficie. La partición relativa entre estas tres alternativas depende de propiedades de la superficie como las indicadas en la Tabla 4. Especialmente importante desde el punto de vista de contaminación atmosférica, es la fracción de calor que se traspasa al aire cercano a la superficie, el cual es denominado flujo de calor sensible. En condiciones diurnas sobre tierra, este flujo es típicamente positivo (calor pasa en forma neta desde la superficie al aire) y constituye una fuente importante de turbulencia en la capa límite atmosférica.

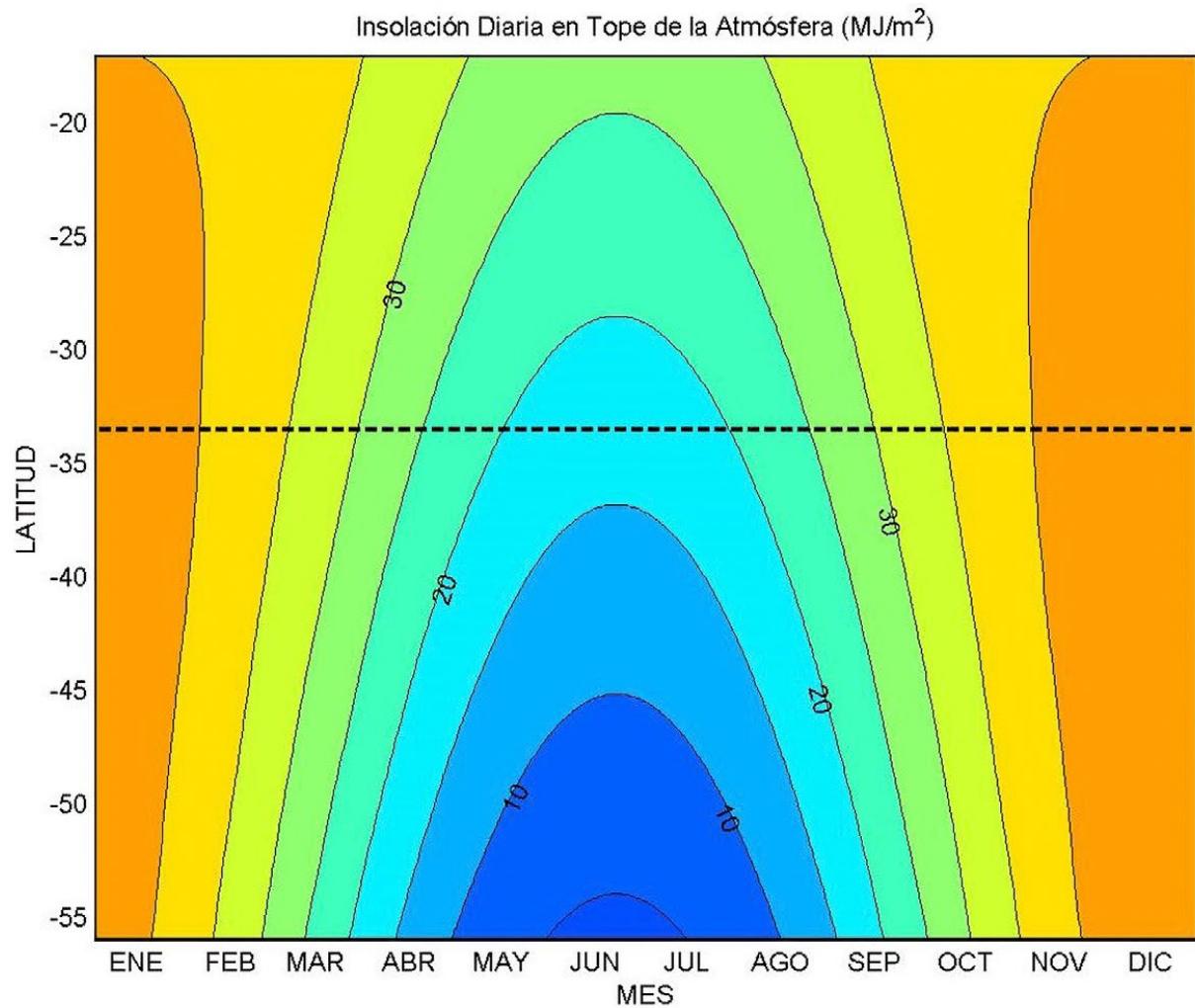
La forzante de radiación solar del BES tiene una muy marcada variación horaria y estacional, que se traspasa a todos los demás componentes del balance. La Figura 16 ilustra la variación estacional de la radiación solar disponible en el tope de la atmósfera (es decir, no incluye efectos de nubes ni absorción en la atmósfera) para lugares en el rango de latitudes de Chile continental. De acuerdo con esta figura, para un sitio en 33.5° S, la cantidad de energía solar máxima disponible en invierno es menos de un 50% de la disponible en verano. Este es uno de los factores que hace que los niveles de turbulencia y la altura de la capa límite diurna en invierno sean mucho más bajos que en verano.

Tabla 4. Propiedades de la superficie importantes en el BES

| PARÁMETRO | RELACIÓN CON EL BES |
|--------------------------------|---|
| Albedo | Reflectividad en onda corta. Determina la fracción de energía solar que queda disponible en superficie. |
| Emisividad | Determina la eficiencia de emisión radiativa de onda larga de la superficie. |
| Conductividad térmica | Determina cuánto calor se conduce al subsuelo. Depende del tipo de suelo y su contenido de agua. |
| Disponibilidad de agua | Determina fracción de energía usada en evaporación de agua desde el suelo. |
| Presencia de vegetación | Determina la fracción de energía usada en transpiración vegetal. Importa también el tipo de vegetación, su fase de desarrollo, etc. |
| Rugosidad | Determina el perfil vertical de viento cerca del suelo, y, por lo tanto, la intensidad de turbulencia cerca de la superficie. |

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Variación mensual de insolación diaria recibida en el tope de la atmósfera para el rango de latitudes de Chile continental (línea segmentada representa la latitud de Santiago).



Fuente: elaboración propia



3. FACTOR DE TRANSPORTE

3.1 Conceptos básicos

El transporte horizontal de los contaminantes es principalmente debido al viento, y, por tanto, depende de la dirección e intensidad del flujo de aire en el nivel de las emisiones. La magnitud del viento en la fuente emisora provee además una dilución inicial de los contaminantes, considerando que, a una tasa constante de emisión, la concentración inicial del contaminante en las parcelas de aire que reciben directamente tales emisiones será menor cuanto mayor sea la velocidad del viento.

El movimiento del aire que denominamos viento es principalmente horizontal. La componente vertical del movimiento es generalmente de tipo turbulenta, y su efecto en el transporte vertical de contaminantes se describe en el siguiente numeral. De especial interés en calidad de aire son las condiciones en que el movimiento del aire es casi nulo, llamada condición de calma o quasi-calma. Estas condiciones de estancamiento pueden ser críticas para fuentes emisoras a nivel de superficie, ya que los contaminantes se acumulan en su lugar de origen y la concentración aumenta en el tiempo. En otras situaciones, el viento en superficie no es nulo, pero es débil y de dirección continuamente cambiante, lo que puede indicar presencia de torbellinos horizontales que no renuevan en forma efectiva el aire, sino simplemente lo recirculan.

La velocidad del viento responde a las fuerzas que actúan sobre las parcelas de aire. La importancia relativa de las distintas fuerzas cambia según la escala considerada. En las

escalas global y sinóptica, las fuerzas principales son las debidas a gradientes horizontales de presión y la fuerza de Coriolis. Ellas determinan la intensidad y dirección de los vientos a escala regional, por sobre la capa límite atmosférica. En la mesoescala, los gradientes de presión son influenciados por la topografía, especialmente cuando la superficie del terreno se calienta o enfriá en forma significativa. Estos cambios de temperatura superficial inducirán patrones de circulación asociados a la topografía como se describe más adelante. Por último, en la escala más pequeña, dentro de la capa límite y cerca de la superficie, el viento percibe continuamente el roce con la superficie que intenta frenar el movimiento, por lo que la velocidad del viento cerca de la superficie depende del balance entre las forzantes de gran escala, mesoescala y la fricción superficial.

3.2 Rasgos de la circulación general y de escala sinóptica

El rasgo más característico de la circulación atmosférica en Chile lo constituye una gran región de altas presiones (anticiclón) ubicada en el Pacífico frente a las costas del norte del país. Su centro se encuentra aproximadamente entre los 25°–30° de latitud sur, y a unos 90° de longitud oeste, pero su dominio se extiende hasta 35°–40° sur y sobre toda la región norte-centro de Chile. Este anticiclón subtropical corresponde a la región de descenso de la circulación de Hadley, por lo cual en su seno se observa un paulatino descenso de las parcelas de aire. Esta subsidencia trae consigo calentamiento por compresión adiabática, lo cual hace que la estructura de la tropósfera en este anticiclón se caracterice por temperaturas relativamente altas, una gran estabilidad, y una humedad atmosférica muy baja. El anticiclón es un rasgo semi-permanente de la climatología de Chile, por lo cual se verá en la mayor parte de las cartas sinópticas de superficie, aunque su intensidad y posición podrán variar en casos particulares. La circulación de los vientos en la tropósfera baja asociada al anticiclón frente a las costas de Chile centro-norte es un flujo de viento sur muy persistente.

En la región al sur del Anticiclón, el campo promedio de la presión superficial muestra isóbaras orientadas zonalmente (a lo largo de paralelos), que pueden interpretarse como un flujo medio intenso de viento del oeste. En esta zona el régimen de circulación es el llamado de latitudes medias, o de los vientos oeste. Sin embargo, en este caso la condición promedio es muy distinta a las condiciones particulares de cada día. En cartas sinópticas individuales, esta región presentará centros de alta y baja presión y sistemas frontales, los que van evolucionando mientras se mueven irregularmente de oeste a este.

Un factor importante para considerar en la climatología de Chile es el efecto del océano adyacente. Las aguas costeras a lo largo de la zona centro-norte de Chile son especialmente frías, lo cual genera en esta región una capa límite marina fría y húmeda. En el tope de esta capa límite marina se encuentra frecuentemente una extensa capa de nubes estratiformes de gran importancia para el clima global. Por sobre ella se extiende una capa de inversión térmica de gran espesor e intensidad (inversión de subsidencia).

3.3 Circulaciones subsinópticas y de mesoescala

3.3.1 Bajas costeras

Bajo ciertas condiciones sinópticas la circulación de la tropósfera baja desarrolla un rasgo de mesoescala denominado vaguada o baja costera, que tiene profundo impacto en las condiciones de estabilidad regional. La baja costera marca una zona de baja presión de mesoescala a lo largo de la costa. En el flanco sur de esta baja presión el flujo inducido tiene componente este, el cual, debido a la pendiente de la ladera montañosa, refuerza la subsidencia y estabilidad de las capas bajas de la atmósfera. En esta región, por tanto, las condiciones de dispersión de contaminantes son extremadamente malas, observándose noches despejadas muy estables y días de gran amplitud térmica. En el flanco norte de la baja costera, en cambio, la situación es la opuesta. El flujo inducido es del oeste, haciendo que el aire marino húmedo y con presencia de nubes bajas ingrese por los valles centrales. La baja costera tiende a propagarse de norte a sur, provocando en un punto dado una sucesión de condiciones de mala ventilación, seguida por ingreso de aire húmedo, nubosidad baja y mejora en la ventilación. Una descripción más completa del fenómeno de baja costera se encuentra en Garreaud y Rutllant (2006).

3.3.2 Brisas de valle/montaña

Cuando la superficie tiene una topografía significativa, el calentamiento diurno y el enfriamiento nocturno de la capa de aire cercana al suelo inducen gradientes de presión y circulaciones de mesoescala características de terreno complejo. En valles y laderas los flujos superficiales tienden a ascender, generando los llamados vientos de ladera y de valle, respectivamente. En valles estrechos, los flujos de ladera pueden forzar una circulación secundaria de subsidencia a lo largo del eje longitudinal del valle.

Durante las noches, el aire cercano a la superficie se enfriá y torna más denso que el aire sobre el valle. Este aire frío y denso tiende a escurrir pendiente abajo, en lo que se denomina flujo catabático. Las zonas más bajas de valles tenderán de este modo a acumular bolsones de aire frío y de gran estabilidad.

3.3.3 Brisas de mar/tierra

La línea de costa implica una abrupta discontinuidad (salto) en las propiedades superficiales, desde las condiciones de la superficie del mar a las propiedades de la superficie continental adyacente. Una de las propiedades cuyo cambio es más significativo es la capacidad calórica. El agua líquida tiene una capacidad calórica mucho mayor que la del suelo, lo que hace que frente al mismo forzante radiativo, la variación diurna de la temperatura sobre el agua sea

mucho menor que sobre la faja costera. Durante las horas diurnas esta diferencia térmica genera una circulación directa que en la costa produce una brisa de mar (desde el mar). En la noche, es la faja terrestre la que se enfriá más que el mar adyacente, y la circulación local es una brisa de tierra (desde la tierra). Estas circulaciones tienen ramas de cierre en altura, que presentan direcciones opuestas. La intensidad y espesor de estas circulaciones locales varían a lo largo de las horas, y serán afectadas también por la topografía costera, la presencia de nubes, la temperatura de las corrientes marinas superficiales, la rotación terrestre y los gradientes de presión de escala sinóptica.

4. FACTOR DE DISPERSIÓN

4.1 Turbulencia atmosférica

En general, la dispersión de sustancias en un fluido puede ser por difusión molecular o por difusión turbulenta. El primer mecanismo se ejemplifica comúnmente en la difusión de una gota de tinta negra que es inyectada en un vaso con agua en reposo y lentamente es capaz de oscurecer toda el agua del vaso. La difusión molecular se origina en el movimiento microscópico de las moléculas del fluido y de la sustancia considerada. La difusión molecular no es significativa en la atmósfera como mecanismo de dispersión, excepto en regiones muy cercanas a las superficies (milímetros).

La dispersión turbulenta es realizada por el movimiento irregular de parcelas macroscópicas de aire, el cual induce una mezcla rápida de los contaminantes y otras propiedades. Este movimiento irregular de las parcelas de aire se denomina turbulencia, y es una característica común del movimiento de fluidos poco viscosos como el aire. Desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, es de primordial interés cuantificar la intensidad de la turbulencia, así como evaluar los factores que la controlan, por cuanto mientras más intensa sea la turbulencia, más rápida será la dispersión de los contaminantes. El impacto más significativo de la turbulencia es causar dispersión de los contaminantes en la dirección vertical, ya que, siendo el viento promedio cerca de la superficie quasi horizontal, el único mecanismo efectivo de dilución en la dirección vertical es la dispersión turbulenta. Los dos factores principales que afectan la intensidad de la turbulencia son el factor mecánico y el factor convectivo o de estabilidad, los que se describen a continuación.

4.2 Factor mecánico de la turbulencia

Cuando capas aledañas de un fluido poco viscoso como el aire se mueven a velocidades distintas entre sí, se originan inestabilidades en el movimiento que dan lugar a torbellinos irregulares que producen las perturbaciones del flujo que llamamos turbulencia. Así pues, regiones de la atmósfera en que la velocidad del viento (en su magnitud y dirección) cambia rápidamente en el espacio serán proclives a mostrar alta turbulencia y mezcla intensa. Un ejemplo importante lo constituye la región de la capa límite más cercana al suelo. En esta zona el viento disminuye rápidamente en magnitud al acercarnos a la superficie, lo cual se asocia típicamente a altos niveles de turbulencia. La intensidad de la turbulencia generada de este modo depende en forma importante de la magnitud del viento, lo cual se describe como el factor mecánico de la turbulencia, para distinguirlo de los factores de estabilidad que se reseñan más adelante. En zonas con alta frecuencia de condiciones de calma o quasi-calma, o en las fases del ciclo diario en que el viento cercano a la superficie se debilita, el factor mecánico de la turbulencia es pequeño, la intensidad de la turbulencia será probablemente baja, y los contaminantes emitidos cerca de la superficie tendrán escasa dispersión vertical.

4.3 Factor de estabilidad de la turbulencia

Un segundo factor que afecta la intensidad de la turbulencia en la capa límite atmosférica es aquel debido a las fuerzas de empuje que aparecen cuando existe variabilidad en la densidad de las parcelas de aire. El principio de Arquímedes indica que una parcela de aire menos densa que su entorno percibe una fuerza de empuje que tiende a hacerla ascender, mientras que una de mayor densidad que su entorno tiende por este mismo efecto a descender. Las fuerzas de empuje afectan directamente la componente vertical de las fluctuaciones turbulentas del flujo, y, por consiguiente, el alcance de la dispersión vertical de los contaminantes.

Aunque las fuerzas de empuje se originan en variaciones de densidad, la práctica común es describir el factor de estabilidad en términos de las variaciones de temperatura. Esto es posible gracias a que para las parcelas de aire en la capa límite atmosférica, las perturbaciones de densidad están inversamente relacionadas con las perturbaciones de temperatura, de tal modo que puede decirse que las fuerzas de empuje hacen que parcelas de aire con mayor temperatura que su entorno tiendan a ascender, y parcelas más frías que su entorno tiendan a descender.

En contraste con el factor mecánico de la turbulencia, el cual siempre es un factor que en mayor o menor grado produce turbulencia, el factor de estabilidad puede aumentar o disminuir los niveles de turbulencia del flujo atmosférico. Que ocurra una u otra cosa depende del gradiente vertical de temperatura. En el caso que la temperatura media decrezca muy rápidamente con la altura (a una tasa de descenso mayor a $\sim 1^{\circ}\text{C}/100$ metros), las fuerzas de empuje tienden a exacerbar los movimientos verticales del fluido, y, por lo tanto, a intensificar la turbulencia. En cambio, cuando la temperatura media decrece más lentamente con la altura, o, más aún,

cuando la temperatura es constante o incluso aumenta con la altura, las fuerzas de empuje que actúan sobre las parcelas de aire hacen que los movimientos verticales sean atenuados rápidamente y los niveles de turbulencia se reduzcan. El valor $\sim 1^{\circ}\text{C}/100$ metros del gradiente vertical de temperatura se utiliza entonces para distinguir lo que se denomina comúnmente como condición inestable en que las fuerzas de empuje intensifican la turbulencia, de la condición estable en que las fuerzas de empuje disminuyen la intensidad turbulenta. El caso en que el gradiente es cercano a $1^{\circ}\text{C}/100$ metros es llamado condición neutra, y representa el estado al cual tiende el perfil vertical de temperatura cuando la mezcla turbulenta es intensa.

Por esencia, las condiciones inestables se observan en lugares muy específicos y en períodos muy particulares. Siendo inestables, estas capas inducen una mezcla vertical muy vigorosa, lo cual hace rápidamente tender el perfil de temperatura a la condición de neutralidad. Capas inestables se presentan cerca del suelo en días con buena insolación, en que el calentamiento radiativo de la superficie hace que la temperatura disminuya rápidamente con la altura en las primeras decenas de metros sobre la superficie. Sobre esta capa inestable, se observará una capa neutra o ligeramente estable, denominada capa de mezcla diurna o capa límite convectiva, que será descrita más adelante.

Las condiciones estables son más ubicuas en la atmósfera. De hecho, vimos en el numeral 1.1 de este Anexo que el perfil promedio de temperatura en la tropósfera tiene un gradiente de $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$, el cual corresponde a una condición estable. Un caso particular de capa estable es una región en que la temperatura aumenta con la altura. Esta condición se denomina inversión térmica, por cuanto el gradiente vertical de temperatura tiene signo opuesto a la condición promedio de la tropósfera. En términos de estabilidad, una inversión térmica presenta condiciones de alta estabilidad y, por lo tanto, en ella la dispersión turbulenta en la dirección vertical está fuertemente suprimida.

La inversión térmica más extensa es la que abarca la estratosfera. En la tropósfera se observan varios tipos de inversión térmica, que se distinguen según su mecanismo de formación. La más común es la inversión térmica nocturna o radiativa, que se desarrolla cerca del suelo en las horas de la noche. Su origen es el enfriamiento radiativo del suelo y el consiguiente enfriamiento de las capas de aire cercanas a él. Otras inversiones térmicas son la inversión de subsidencia, la inversión frontal y la inversión de advección. Desde el punto de vista de contaminación atmosférica es fundamental identificar la presencia de inversiones térmicas, cuantificar su intensidad (magnitud del gradiente vertical de temperatura) y su espesor, y evaluar su impacto en la relación entre emisiones y concentraciones.

4.4 Influencia de la superficie

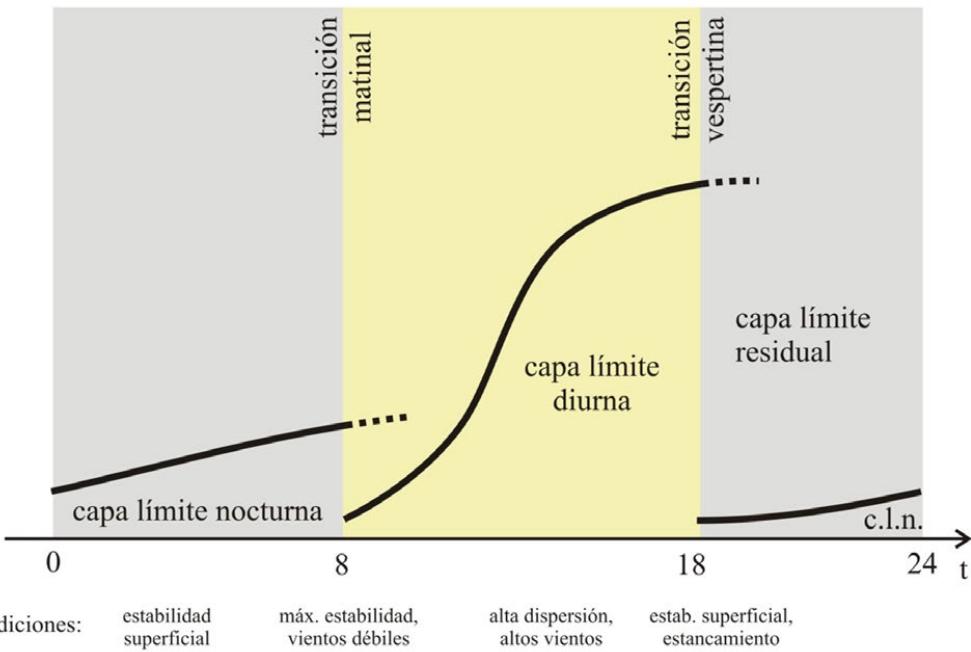
Los dos factores de la turbulencia descritos en las secciones previas están fuertemente influenciados por las propiedades de la superficie. El factor mecánico es afectado por las características de la rugosidad superficial y la presencia de obstáculos en la superficie. Por su parte, el factor de estabilidad está íntimamente ligado al balance de energía superficial descrito antes. En particular, la producción de turbulencia por las fuerzas de empuje está directamente relacionado con el flujo de calor sensible intercambiado entre la superficie y la capa de aire cercana al suelo. Cuando este flujo es positivo, como ocurre normalmente durante el día sobre una superficie de tierra, las condiciones cercanas a la superficie tienden a ser inestables y la turbulencia es más intensa. Al contrario, durante la noche, en que el flujo de calor sensible es usualmente negativo, las condiciones son generalmente estables y la turbulencia es muy débil o incluso esporádica.

5. CICLO DIARIO DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA O CAPA DE MEZCLA

Habiendo presentado en las secciones previas los principales factores meteorológicos que median la relación entre emisiones y concentraciones de contaminantes atmosféricos, resulta ilustrativo describir aquí, a modo de ejemplo, una secuencia típica del ciclo diario de la capa límite atmosférica y su relación con el impacto en la calidad del aire que tendrían dos tipos de fuentes emisoras: una fuente A de tipo puntual y de altura, como podría ser una chimenea con descarga a 100 metros sobre la superficie, y otra fuente B a nivel superficial de tipo distribuido, como podrían ser las emisiones asociadas a la actividad de un poblado o ciudad, o las emisiones fugitivas de una actividad industrial (Figura 17). El caso hipotético que consideraremos es aquél sobre condiciones relativamente simples: valle transversal semiárido en la zona central del país, con topografía no muy compleja, uso de suelo relativamente homogéneo, forzantes meteorológicas de escala sinóptica débiles, cielos despejados, tasa de emisión constante, contaminante no reactivo. En la última sección mencionaremos variaciones más complejas que podrían ser importantes en algunos casos.

En la figura a continuación, los signos + y - indican cualitativamente los períodos en que las distintas fuentes tienen mayor o menor impacto en las concentraciones de su entorno a nivel de superficie.

Figura 17. Esquema de ciclo diario típico de la CLA sobre tierra e impactos esperados en superficie para fuentes emisoras superficiales y de altura.



Impactos en superficie:

| | | | | | | |
|--------------------|---|----|----|----|-----|---|
| Fuente superficial | + | ++ | - | -- | +++ | + |
| Fuente en altura | - | - | ++ | + | - | - |

Fuente: elaboración propia

5.1 Capa límite diurna

Durante un día despejado la mayor parte de la radiación solar atraviesa la atmósfera y es absorbida en la superficie. El calentamiento de la superficie calienta a su vez el aire más cercano a ella, y comienza a generarse el proceso de convección. La capa límite diurna va aumentando paulatinamente su temperatura, a la vez que va aumentando también su altura. Debe enfatizarse que durante el crecimiento de la capa límite diurna por convección, su tope no es una superficie rígida que se desplaza hacia arriba. Más bien, la convección incorpora gradualmente aire de la capa atmosférica sobre la capa límite y lo mezcla con el aire de la capa límite. La altura máxima de la capa límite diurna se alcanza durante la tarde, alrededor de la hora en que la temperatura superficial alcanza su máximo.

La capa límite diurna o convectiva es muy turbulenta (producción convectiva de turbulencia) y, por lo tanto, en ella se observa una buena mezcla de sus propiedades (por lo cual se denomina también capa de mezcla). Las concentraciones de contaminantes en la capa de mezcla tienden a ser constantes en la vertical. El perfil vertical de temperatura, por su parte, tiende a ser muy cercano al gradiente de estabilidad neutra ($-1^{\circ}\text{C}/100$ metros), excepto cerca de la superficie en que es decididamente inestable.

Tanto el calentamiento de la capa de mezcla diurna, como la intensidad de la turbulencia en su interior están directamente ligados al traspaso de calor sensible desde la superficie a la capa límite. Por lo tanto, un factor importante que controla la tasa de crecimiento de la capa de mezcla es el balance de energía en superficie. Esta dependencia le entrega a la altura de la capa de mezcla una importante variabilidad estacional, debido a las diferencias de radiación solar recibidas en superficie a lo largo del año. Otro factor de importancia comparable es la estabilidad que tenía la atmósfera cercana al suelo al momento de iniciarse la convección diurna. En general, mientras más estable haya sido el perfil vertical de temperatura resultante al final de la noche, más lento será el crecimiento de la capa de mezcla en el día siguiente. Dado que la estabilidad nocturna puede ser relativamente variable entre distintas noches, este factor entrega a la capa de mezcla diurna una variabilidad interdiaria o sinóptica importante.

En ausencia de una forzante de gran escala importante, los vientos diurnos en el valle serán forzados principalmente por el calentamiento de la topografía. En consecuencia, la intensidad y dirección del viento dependerá mucho de la configuración topográfica y el uso del suelo a escala regional. Las mayores velocidades se registrarán a media tarde y su dirección tendrá una componente importante dirigida valle arriba.

Debido a la vigorosa mezcla existente en la capa límite diurna, los contaminantes emitidos por nuestras fuentes A y B en la Figura 17, serán rápidamente repartidos en toda la capa límite (suponemos que la altura de la capa de mezcla es mayor que la altura de la chimenea A). Las concentraciones medias resultantes serán en estas condiciones inversamente proporcionales a la altura de la capa de mezcla, lo que explica en parte que en general las concentraciones de media tarde sean relativamente menores a las de la mañana en el caso de fuentes emisoras de superficie. Para el caso de la chimenea A, las condiciones convectivas pueden producir a nivel instantáneo impactos muy grandes en la superficie de su entorno. Esto ocurre cuando el penacho es capturado por una rama descendente de las termales convectivas existentes y es llevado casi sin dilución hasta la superficie. Debido a lo turbulento del fenómeno, sin embargo, este impacto durará a lo más algunos minutos, y rápidamente el penacho subirá y se mezclará diluyéndose en la capa límite completa.

5.2 Capa límite nocturna

La capa límite nocturna se puede definir en función del desarrollo de la inversión térmica radiativa. Para una noche despejada, a partir de la puesta de sol la inversión superficial va creciendo en espesor a medida que la temperatura superficial va disminuyendo. El enfriamiento nocturno depende de las propiedades emisivas de la superficie y también está controlado por el contenido de vapor de agua en la columna atmosférica. En caso de existir nubosidad, el enfriamiento nocturno cerca de la superficie decrece considerablemente, e incluso podría no desarrollarse una inversión superficial.

La turbulencia en la capa límite nocturna es más difícil de evaluar o estimar que en el caso diurno. La única fuente importante de turbulencia es el cizalle del viento (factor mecánico), puesto que, como hemos visto, en condiciones estables el factor de estabilidad tiende a suprimir la turbulencia. De este modo, muchas veces la turbulencia nocturna es intermitente o esporádica, pues se alterna entre el dominio de la producción turbulenta por cizalle y la destrucción por estabilidad. Las noches con mayor turbulencia (mayor viento) muestran normalmente una inversión térmica de mayor espesor y menor estabilidad, mientras que las noches calmas producen una inversión más intensa y concentrada en superficie.

En ausencia de una forzante de gran escala importante, los vientos nocturnos en el valle serán forzados principalmente por el enfriamiento de la topografía. En consecuencia, la intensidad del viento dependerá mucho de la configuración topográfica y el uso del suelo a escala regional. El flujo superficial nocturno forzado por el enfriamiento del aire cercano al suelo se denomina flujo de drenaje o flujo catabático. Su intensidad es comúnmente menor que el flujo diurno, aunque en zonas del desierto del Norte Grande se han medido flujos nocturnos de gran intensidad. La dirección del flujo catabático es pendiente abajo de la topografía y puede ser imaginado como el movimiento de una capa de fluido frío y denso que escurre por la topografía hacia los niveles más bajos. Zonas de terreno con poca pendiente o que configuren hondonadas tenderán a presentar vientos superficiales nocturnos muy débiles, condiciones de cuasi-calmia, o torbellinos horizontales muy débiles que simplemente recirculan el aire en su interior, sin renovarlo.

Para nuestras fuentes A y B, las condiciones nocturnas pueden implicar muy distintos niveles de impacto. Estando las emisiones de B a nivel de superficie, la débil dispersión vertical en la noche hace que ellas queden concentradas en superficie y puedan llegar a provocar gran impacto local. Sólo el desarrollo del flujo de viento nocturno, con su consecuente transporte y dispersión turbulenta, podrá mitigar en parte el impacto. Si el viento es débil, o recirculante, sin embargo, pueden originarse varias horas de altas concentraciones en superficie asociadas a la fuente B. Para la fuente en altura A, en cambio, las condiciones nocturnas podrían reducir su impacto, puesto que la débil turbulencia dificulta un transporte eficiente de las emisiones en altura hasta la superficie. En condiciones típicas, el flujo de drenaje no se percibe a la altura de la fuente A, y las emisiones de la chimenea serán transportadas con el viento impuesto por algún gradiente de presión de escala regional o sinóptica. Debido a la escasa turbulencia, el penacho podrá tener un gran alcance horizontal sin ser diluido significativamente.

5.3 Transiciones

En las primeras horas de la mañana y al final de la tarde se desarrollan las transiciones matinal y vespertina, respectivamente, en que la capa límite cambia de régimen. Ocurren normalmente en estas horas fenómenos que pueden afectar significativamente los niveles de impacto de las fuentes emisoras.

5.3.1 Transición matinal

Durante la transición matinal, la altura de la capa de mezcla aumenta rápidamente en el tiempo, partiendo desde una altura mínima. Este crecimiento va mezclando sucesivamente las capas de aire más cercanas a la superficie. Si nuestra fuente A tuvo poco impacto en superficie durante la noche debido a que el penacho de la chimenea se mantuvo a cierta altura, en algún instante durante la transición matinal estos contaminantes serán rápidamente mezclados verticalmente, produciéndose altas concentraciones instantáneas del contaminante en superficie. Este fenómeno se denomina fumigación, y puede causar agudos *peaks* de concentraciones a media mañana en el entorno de una chimenea alta.

5.3.2 Transición vespertina

Durante la transición vespertina, el fenómeno de mayor interés desde el punto de vista de la contaminación atmosférica es que por alrededor de una hora, la intensidad de los vientos cerca de la superficie decrece rápidamente, observándose condiciones de quasi-calmaz. En ausencia de una forzante de gran escala significativa, esta condición persistirá hasta que los flujos de drenaje nocturno comiencen a desarrollarse. Para nuestra fuente A, en este periodo las emisiones de la chimenea dejarán de percibirse en superficie, mientras que las emisiones de la fuente superficial B dejarán de tener una dispersión vertical importante, lo cual, agregado al débil transporte, hace que comúnmente esta fase del ciclo diario sea la más crítica para fuentes emisoras superficiales.

5.4 Variaciones

La secuencia descrita previamente puede sufrir importantes modificaciones. En primer lugar, bajo una forzante sinóptica más intensa como, por ejemplo, el paso de un sistema frontal, todo el desarrollo local de la capa de mezcla y las circulaciones forzadas por la topografía serán obliteradas por la circulación de gran escala.

Otra variación común en el caso chileno, la constituye el desarrollo de la capa límite en la zona costera. Aquí, el ciclo diario de los vientos en la capa límite estará asociado más a un sistema

de brisas de mar/tierra, que al sistema de valle/montaña considerado en el ejemplo de las secciones anteriores. Un caso especial de fumigación ocurre en la costa cuando el penacho de una chimenea alta ubicada cerca de la línea de costa es transportado tierra adentro en la fase diurna del ciclo diario. En este caso se observa a veces que a cierta distancia de la costa el penacho es mezclado rápidamente en la dirección vertical produciendo un impacto agudo en la superficie. Esta fumigación costera ocurre cuando la mayor turbulencia asociada a la mayor rugosidad y al mayor calentamiento de la superficie terrestre llega al nivel del penacho y mezcla los contaminantes hasta la superficie. Por último, en la zona costera del centro y norte del país el ciclo diario de la capa límite estará influenciado por la altura e intensidad de la inversión de subsidencia, la intensidad de los vientos costa afuera, y la presencia o ausencia de la frecuente nubosidad estratiforme costera.

6. MEDICIONES METEOROLÓGICAS PARA CALIDAD DEL AIRE

6.1 Características especiales

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) cuenta con una red de estaciones meteorológicas a lo largo del país. Los objetivos principales de esta red son la meteorología sinóptica (predicción del tiempo) y el control de las condiciones aeronáuticas. Para estudios de contaminación atmosférica los datos de la DMC pueden servir de referencia, pero la mayor parte de las veces serán insuficientes. Recordemos, por ejemplo, que la escala de los fenómenos sinópticos es mucho mayor que la de los fenómenos de mesoescala y microescala que controlan los problemas de contaminación atmosférica. Asimismo, las condiciones de vientos débiles no son de gran interés sinóptico o aeronáutico, pero son extremadamente importantes para la calidad del aire. Lo anterior, junto a otras razones, explica que en estudios de contaminación atmosférica es muchas veces necesario realizar mediciones meteorológicas específicamente diseñadas para ellos.

6.2 Parámetros meteorológicos básicos

Las mediciones más comunes son hechas en una denominada estación meteorológica automática. Ella está compuesta de sensores meteorológicos, un dispositivo de control y almacenamiento de datos (*datalogger*), y accesorios (mástil, caja para *datalogger*, fuente de poder o panel solar, vientos, cables, etc.). En problemas que requieren monitoreo en tiempo real de las condiciones meteorológicas, la estación debe contar con un sistema de comunicación remota para la transmisión periódica de los datos a una estación base de control. La comunicación de los datos a través de telefonía celular es actualmente muy utilizada para estos efectos. Si la estación no cuenta con transmisión en tiempo real de sus datos, se requiere la visita periódica para la extracción de los datos almacenados en el *datalogger*.

Los parámetros meteorológicos más importantes de medir son la velocidad y dirección del viento. Se requiere que la ubicación de la estación sea representativa del flujo a medir, y que la exposición de los sensores de viento no esté obstaculizada. Mástiles de entre 3 metros a 10 metros sobre la superficie son típicos de estaciones de superficie. Los datos se guardan en la forma de promedios temporales, los que se realizan en períodos de 5 a 15 minutos. Promedios de períodos superiores a 30 minutos son de menor utilidad en problemas de contaminación atmosférica. Además de los promedios es conveniente almacenar las desviaciones estándar de las variables y los máximos instantáneos de viento (ráfagas). Los anemómetros deben tener en lo posible un bajo umbral de sensibilidad, de tal forma de poder medir vientos débiles. Idealmente las estaciones de superficie contarán además con sensores de temperatura y humedad relativa.

6.3 Mediciones de turbulencia

Los sensores ideales para mediciones meteorológicas relacionadas con contaminación atmosférica son los denominados anemómetros ultrasónicos. La velocidad del viento no se mide en este caso con sistemas mecánicos, sino mediante la medición de tiempos de viaje de pulsos de ultrasonido. Algunos diseños incluyen las mediciones de las tres componentes del viento, es decir, se incluye la componente vertical de la velocidad del viento, la que es crucial en la descripción de la dispersión vertical de los contaminantes. Asimismo, los sensores ultrasónicos derivan también una medición de la temperatura virtual del aire.

Las ventajas de estos sensores son su alta sensibilidad y la posibilidad de medir velocidades y temperaturas quasi instantáneas. De este modo se puede medir la intensidad de la turbulencia atmosférica de manera directa, registrándose las varianzas y covarianzas de las componentes del viento y de la temperatura. En particular, la covarianza entre las perturbaciones turbulentas de la velocidad vertical y de la temperatura, entrega una medición directa del flujo de calor sensible, el cual, como vimos antes, controla la turbulencia convectiva de la capa límite.

6.4 Balance de energía superficial

Al menos una de las estaciones meteorológicas de superficie debe contar con sensores que permitan evaluar la máxima cantidad de los diversos términos del balance de energía superficial. La estación debe estar emplazada en un lugar con condiciones representativas de la superficie del entorno (ver parámetros importantes de la superficie en Tabla 4). Entre los sensores a considerar están distintos tipos de radiómetros, que se diferenciarán de acuerdo con las longitudes de onda que registran y la dirección que enfrentan (cénit o nádir). Sensores infrarrojos de la temperatura del suelo pueden ser útiles a veces, así como sensores de flujo de calor al subsuelo.

6.5 Perfiles verticales

La medición de la estabilidad atmosférica superficial será de extrema importancia en los problemas de calidad del aire. Diferencias de temperatura entre dos niveles se miden mediante termocuplas colocadas sobre una torre del orden de 20 metros sobre el nivel del suelo, o bien mediante termómetros independientes apropiadamente intercomparados. Idealmente, se medirá temperaturas o diferencias de temperatura a varios niveles sobre el suelo.

Medición del perfil vertical de temperatura a una escala mayor (por ejemplo, en los primeros 100 o 500 metros sobre el nivel del suelo) es también muy deseable. Una posibilidad son los radiosondeos de alta resolución. Una alternativa que en ciertos casos puede ser útil es instalar estaciones de superficie sobre cerros o laderas a distintas alturas. Estos pseudo perfiles verticales deben ser validados respecto a perfiles verticales reales, mediante, por ejemplo, campañas especiales de medición.

En campañas intensivas de medición se puede hacer uso de globos cautivos con uno o más sensores meteorológicos colgados de su cable de izado o incluso de mediciones meteorológicas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) apropiadamente instrumentados. En el último tiempo, equipos de sensoramiento remoto como perfiladores radioacústicos o de tipo Sodar o Lidar (Emeis, 2011) se han hecho más accesibles en cuanto a costo, tamaño y facilidad de operación, por lo que también son alternativas a evaluar para conseguir mediciones de alta resolución temporal y espacial de variables meteorológicas, ya sea en campañas intensivas o para monitoreo extendido.



7. EJEMPLOS

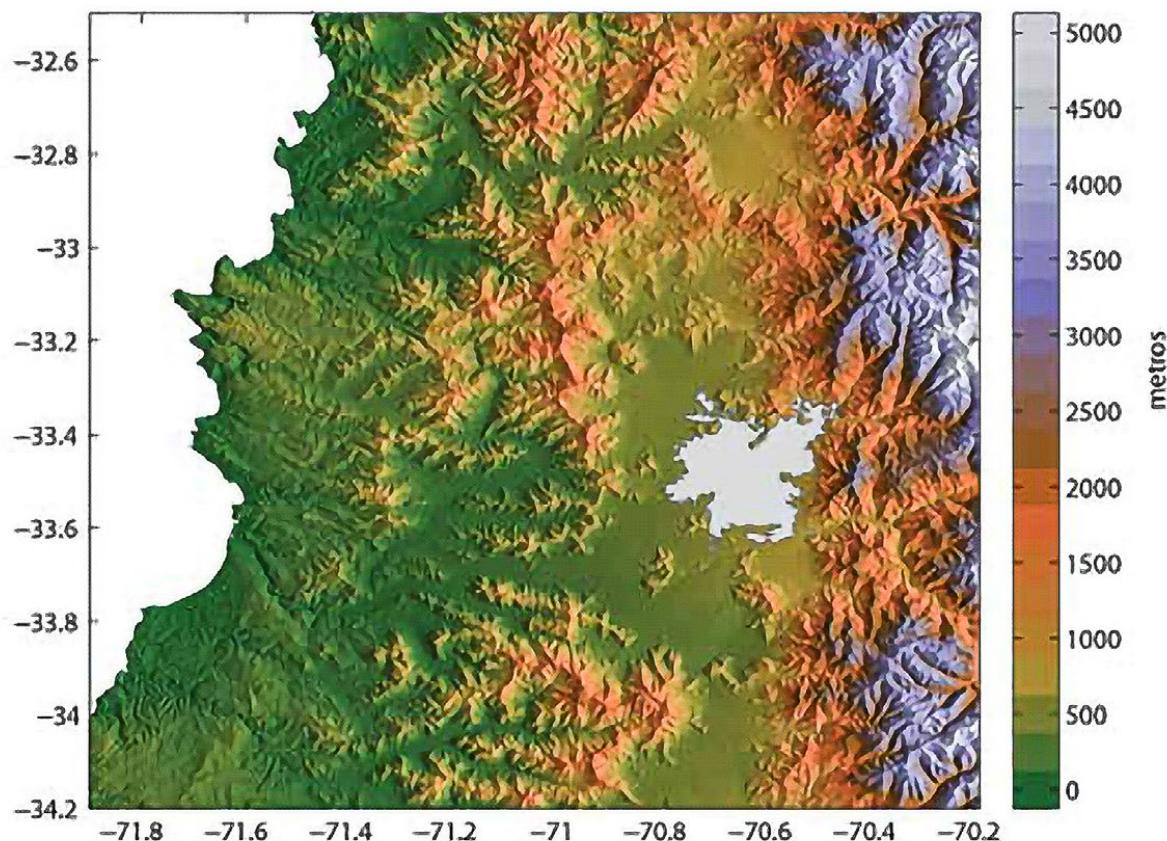
En esta última sección analizaremos datos de dos casos de contaminación atmosférica importantes en Chile que servirán para ilustrar de manera más concreta la discusión anterior en términos de las fuentes hipotéticas A y B. El primero corresponde al problema de material particulado de la ciudad de Santiago, el cual puede considerarse representativo del impacto de emisiones distribuidas a nivel de superficie (ejemplo de fuente B). El segundo ejemplo se refiere al problema de SO₂ en el valle de Copiapó, el cual ejemplifica el impacto de una fuente emisora puntual de altura (ejemplo de fuente A). En ambos casos el análisis no es exhaustivo, sino simplemente intenta ilustrar algunos de los conceptos descritos antes mediante gráficos construidos a partir de datos de acceso público.

7.1 Santiago (fuentes superficiales)

7.1.1 Topografía y meteorología

La Figura 18 muestra el relieve topográfico de la cuenca de Santiago y de sus alrededores. La cuenca abarca una extensión de aproximadamente 100 km N-S y 40 km E-O, ubicándose su piso entre los 300 y 700 msnm. Se encuentra rodeada por cerros de alturas sobre los 1.000 msnm en casi todo su perímetro, estando su conexión con la zona costera en su extremo suroeste por donde escurre el Río Maipo. El lado Este de la cuenca está limitado por el macizo andino que en estas latitudes supera los 4.000 msnm, siendo los valles del Maipo y del Mapocho sus principales incisiones. La zona urbana se ubica en una zona relativamente plana de la cuenca entre 500 y 700 msnm aproximadamente. El confinamiento lateral de la cuenca, la pendiente de su superficie y su conexión con la zona costera juegan roles importantes en su problema de calidad del aire.

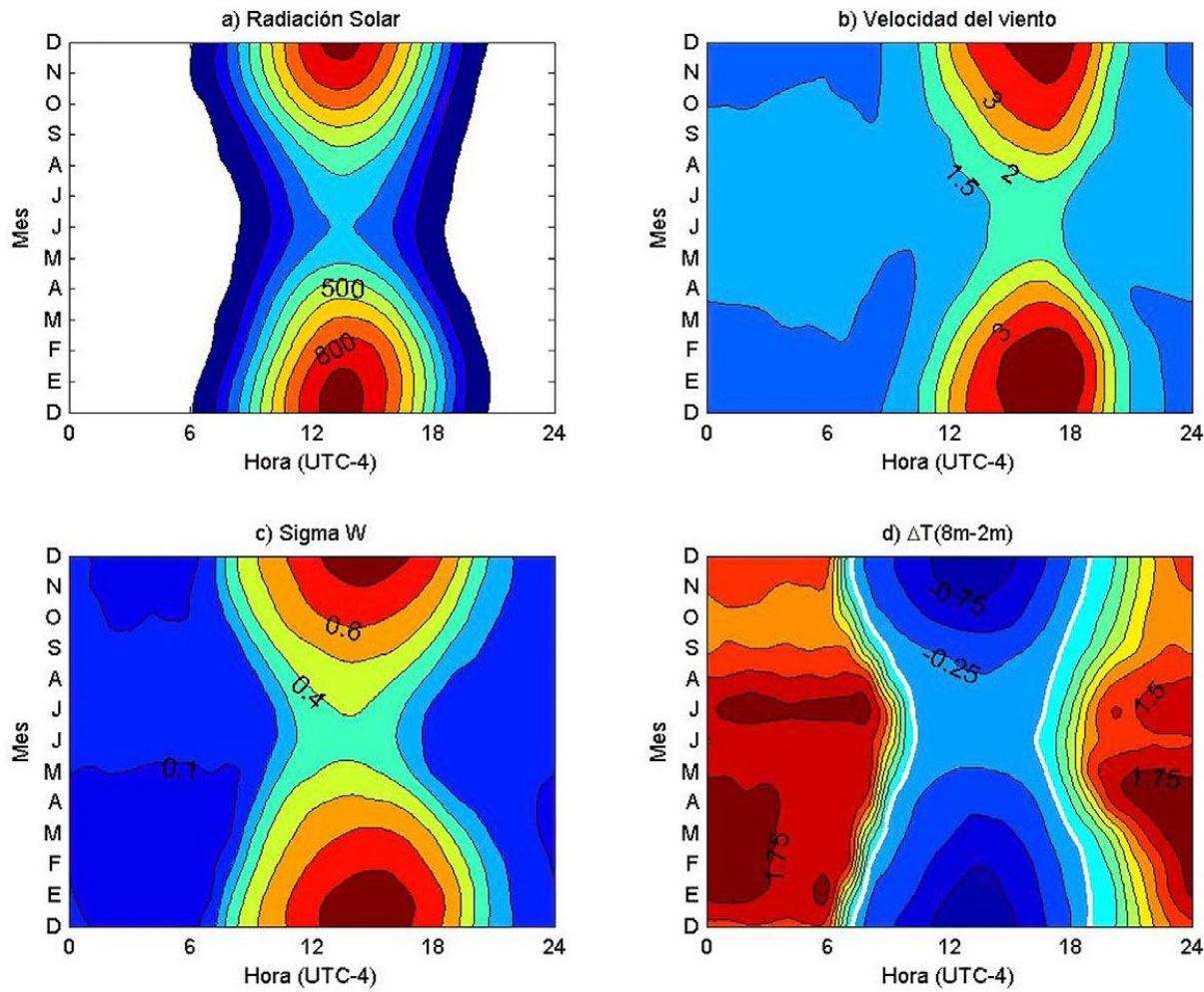
Figura 18. Topografía de la cuenca de Santiago y su entorno.



Fuente: elaboración propia

Aparte de los breves períodos en que los sistemas frontales pasan sobre Santiago produciendo nubosidad, precipitación y fuertes vientos, la circulación atmosférica en la cuenca de Santiago y la dinámica de su capa límite están fuertemente controladas por la intensidad de la radiación solar disponible, la que controla el sistema de brisas de valle-montaña que se desarrolla en su interior. Además de una fuerte variación estacional que se mostró en la Figura 16, la radiación solar disponible en Santiago tiene una gran variación horaria según puede apreciarse en la Figura 19a. Los amplios ciclos diarios y anuales de la disponibilidad energética tienen a su vez gran efecto en la climatología de los vientos superficiales (Figura 19b), la intensidad de la turbulencia vertical (Figura 19c) y la estabilidad del perfil de temperatura cercano a la superficie (Figura 19d).

Figura 19. Diagramas de ciclos diario/anual de variables meteorológicas medidas en la estación micrometeorológica de La Platina (años 1997–2010). a) Radiación solar global con contornos cada 100 W/m². b) Velocidad de viento a 10 metros con contornos cada 0.5 m/s. c) Desviación estándar de la componente vertical de la velocidad del viento a 24 metros con contornos cada 0.1 m/s. d) Diferencia de temperatura entre 8 m y 2 m con contornos cada 0.25°C (años 2002 y 2006–2010 fueron omitidos por posibles problemas de medición). Contorno blanco marca la condición isotermal.

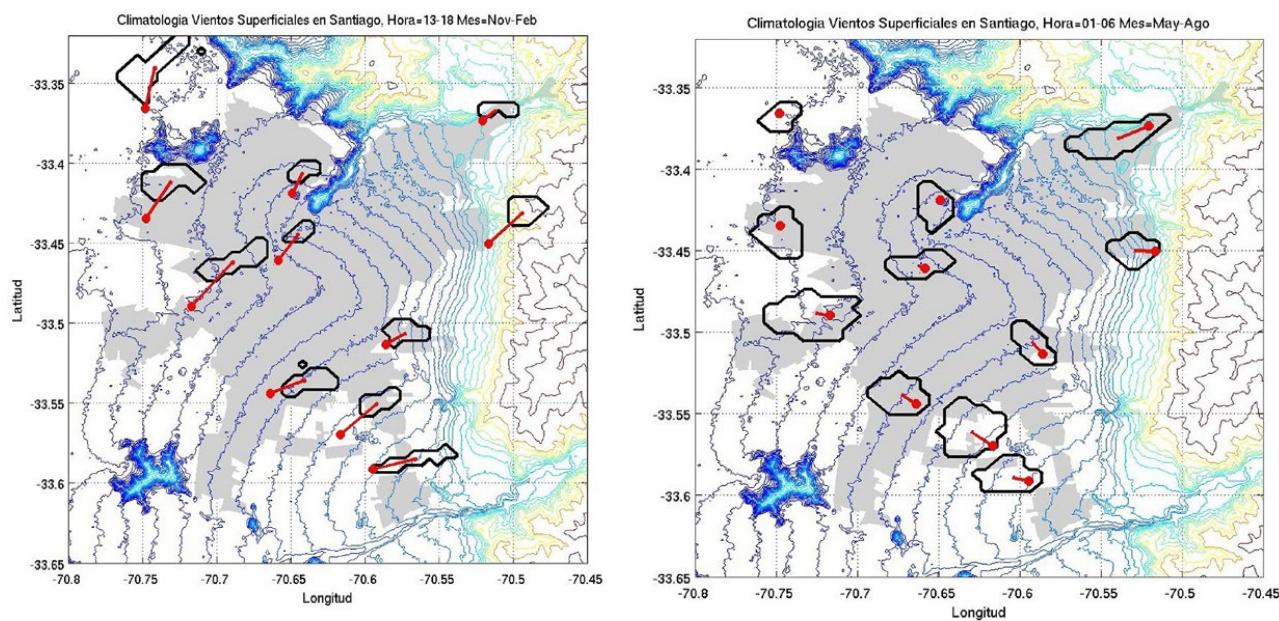


Fuente: Muñoz (2012)

La Figura 20 describe el campo de viento superficial a partir de los datos disponibles de estaciones que operan o han operado en Santiago y sus alrededores. En las condiciones diurnas (Figura 20a) puede verse que vientos con componente SW predominan en toda el área mostrada. Este flujo diurno del SW se entiende como un sistema de brisas forzado por el calentamiento de la cuenca de Santiago y su entorno. La Figura 20a sugiere también que las estaciones ubicadas viento arriba de la ciudad muestran en general magnitudes de viento diurno mayores que las ubicadas en la ciudad misma o en la zona de sotavento, lo que podría deberse a la mayor rugosidad superficial impuesta por la zona urbana.

El campo de viento superficial nocturno que describe la Figura 20b es claramente más débil que el flujo diurno (notar diferencia en las escalas de velocidad). Los valores medios y la variabilidad de los vientos superficiales sugieren que ellos están controlados por la pendiente del terreno en el entorno de cada estación. En efecto, los valores medios de viento en las noches tienen en casi todas las estaciones una fuerte componente dirigida pendiente abajo de la topografía local, lo cual es muy marcado en las estaciones ubicadas en la zona oriente y sur de la ciudad. En la zona norponiente de la ciudad donde la pendiente del terreno es relativamente menor, los vientos nocturnos no tienen una dirección promedio bien definida y el movimiento del aire cercano a la superficie es cuasi calmo o altamente recirculante.

Figura 20. Diagramas ilustrativos de la climatología del viento superficial (10 m) sobre Santiago (área gris indica zona urbana).



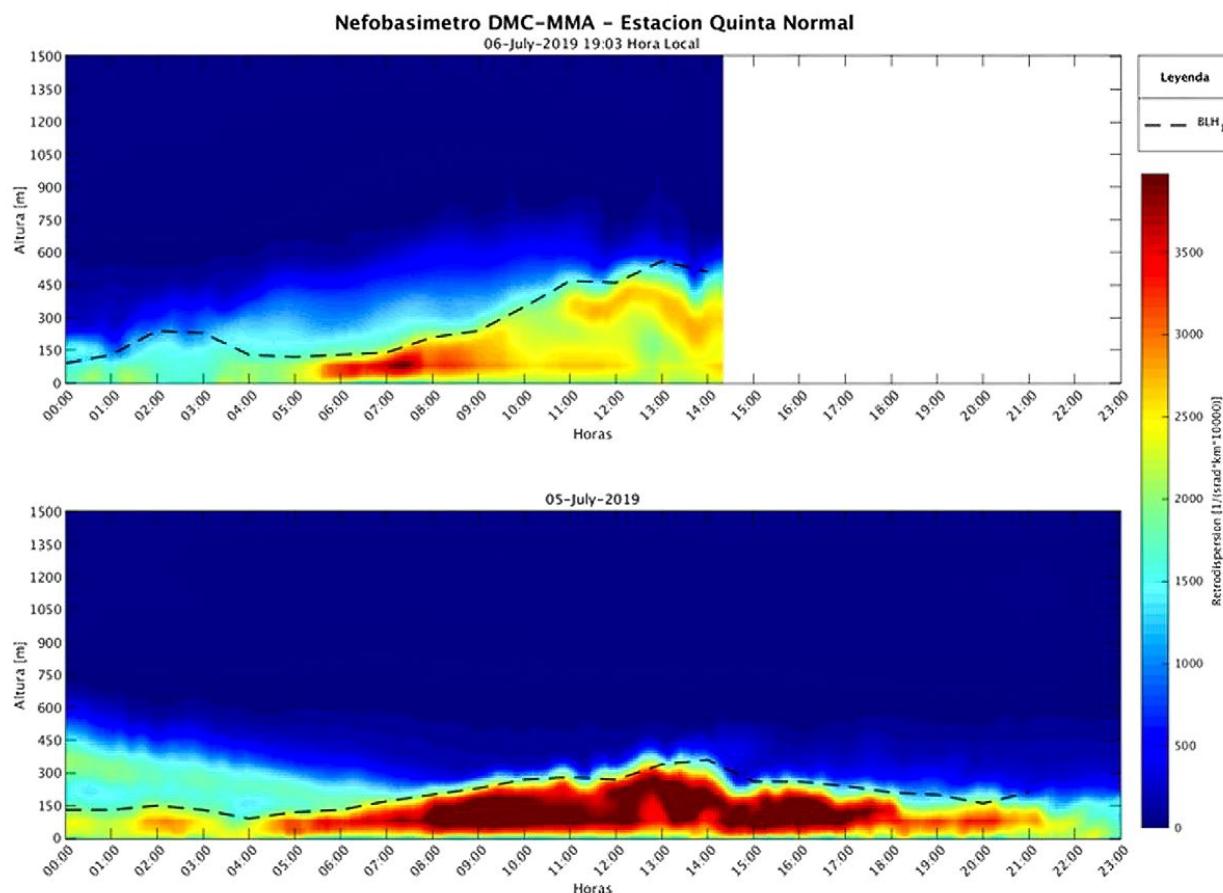
Fuente: elaboración propia

De la Figura 20 cabe aclarar que los contornos del terreno se muestran entre 450 y 750 msnm cada 20 metros y se agregan contornos de 800, 850, 900, 950, 1.000, 1.100, 1.200, 1.500, 2.000, 2.500 y 3.000 msnm. Puntos rojos indican la ubicación de estaciones monitoras de la red Seremi-Salud y de la red Cenma. Vectores rojos muestran desplazamientos (en 30 minutos para panel nocturno y en 15 minutos para panel diurno) asociados a las velocidades medias medidas en cada estación para horas y meses indicados en los títulos de cada figura. Contornos negros ilustran la variabilidad de las velocidades medidas en cada estación, enmarcando la región donde se ubica el 70% de los desplazamientos registrados.

El desarrollo de la capa límite en Santiago se ha podido visualizar muy bien con los datos de reflectividad entregados por un instrumento llamado nefobasímetro. Un ejemplo se muestra

en la Figura 21, donde se ha graficado la evolución de los perfiles verticales de reflectividad entre la superficie y 1.500 metros sobre el nivel suelo para el 5 y 6 de julio de 2019. Altos valores de reflectividad (colores cálidos) se asocian a una mayor concentración de aerosoles atmosféricos, los cuales en el caso de Santiago son excelentes trazadores de procesos en la capa límite. Interpretando de esta forma la Figura 21, podemos decir que las mayores concentraciones de aerosoles se encuentran en los niveles más cercanos a la superficie (los extremos valores de reflectividad bajo los 60 m sobre el suelo podrían estar influenciados por efectos muy locales o problemas instrumentales). El rasgo más notable de esta capa de aerosoles es su crecimiento en altura que ocurre entre las 09 y 17 hora local (en adelante "HL"), partiendo desde aproximadamente 100 metros hasta llegar a alrededor de 600 metros sobre el suelo. Este crecimiento diurno de la capa límite se origina en el calentamiento de la superficie debido a la radiación solar incidente, y el consiguiente calentamiento de las parcelas de aire cercanas a la superficie. Algunas de estas se tornan menos densas que su ambiente y ascienden verticalmente originando las denominadas corrientes termales o térmicas. Estas termales van paulatinamente mezclando (y calentando) niveles sucesivos sobre la superficie, en el proceso denominado convección y que explica en gran medida el crecimiento de la capa límite observado durante el día. En horas de la tarde (16-18 HL en la Figura 21) la radiación solar incidente sobre la superficie deja de entregar energía a las termales y la mezcla convectiva decae rápidamente. En esta transición vespertina la capa límite se desacopla, desarrollándose cerca de la superficie una capa límite nocturna de altura variable, alcanzando en este caso entre 100 y 300 metros sobre el suelo. Por sobre esta capa nocturna, la capa convectiva del final de la tarde pasa a denominarse capa límite residual, por cuanto los procesos de mezcla nocturnos superficiales no la alcanzan a afectar. Esta capa residual en la Figura 21 se puede apreciar entre los 200 metros y 800 metros sobre el suelo en las horas previas a las 09 HL y posteriores a las 18 HL. La extensión vertical de la capa residual parece descender continuamente entre las 00 y 09 HL, lo cual podría deberse a, entre varias posibilidades, un efecto de subsidencia del aire al interior de la cuenca, o bien un efecto de advecciones horizontales. Puede notarse que la capa límite convectiva (diurna) muestra perfiles de reflectividad relativamente homogéneos en vertical, lo cual se observa también, aunque en menor grado, en la capa límite nocturna adyacente a la superficie. Esto explica que ellas sean llamadas a veces capas de mezcla o capas mezcladas, pues cuentan con procesos de mezcla vertical relativamente eficientes. Por su parte, la capa residual muestra mayor heterogeneidad vertical en sus niveles de reflectividad, lo cual es indicativo de que en ella los procesos de mezcla vertical son relativamente débiles.

Figura 21. Corte temporal/vertical de intensidad de *backscatter* instantáneo registrado por nefobasímetro el 5 y 6 de julio de 2019



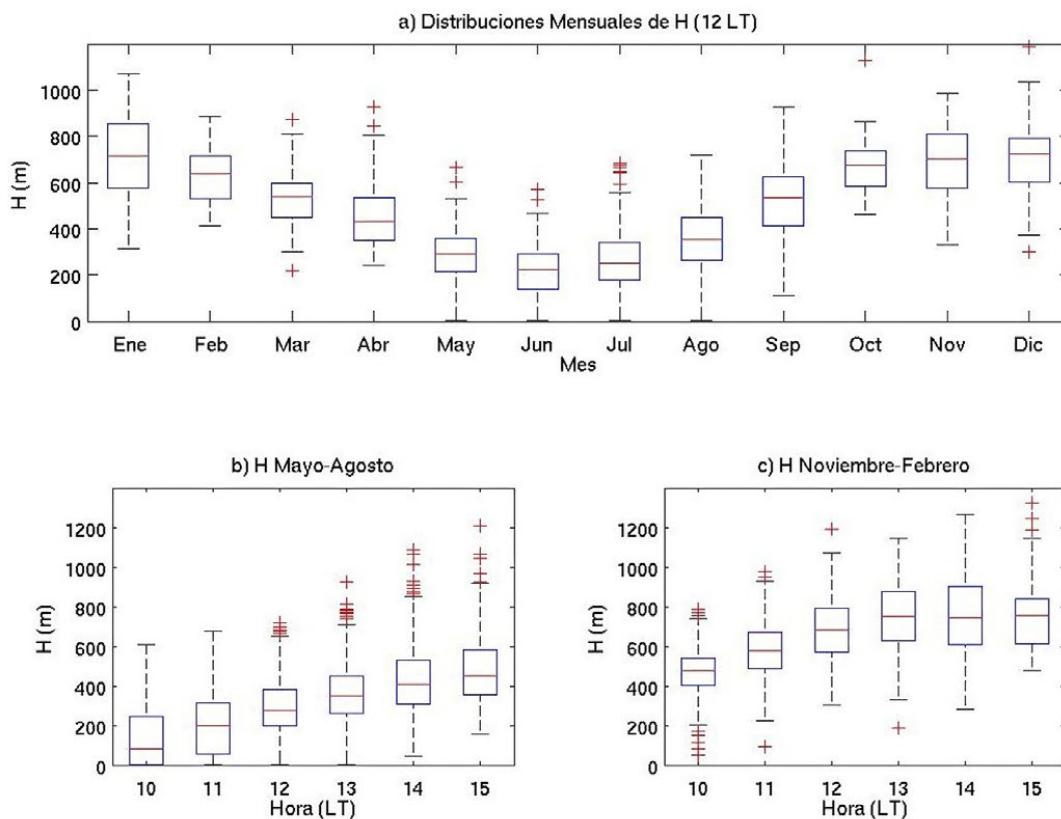
Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, 2022.

Los datos del nefobasímetro como los de la Figura 21 permiten estimar la altura de la capa de mezcla diurna en función de la altura en que los niveles de reflectividad decaen rápidamente. Esto se puede hacer en general para los días en que no se presenta nubosidad baja ni precipitación, pues estos efectos alteran profundamente los perfiles de reflectividad de este instrumento.

Realizando el ejercicio de estimación de la altura de la capa de mezcla para las 12 HL sobre todos los días de los años 2007-2009 en que fue posible hacerlo, Muñoz y Undurraga (2010) presentaron una primera climatología de la altura de la capa de mezcla diurna sobre Santiago, cuyos resultados principales actualizados al año 2012 se muestran en la Figura 22. Se aprecia en ella la variación anual de las alturas de la capa de mezcla, puesto que en el periodo frío del año las alturas son en general más reducidas que en los meses cálidos. Esta variación se debe

principalmente al cambio anual de la radiación solar que llega a la superficie (ver numeral 2 del Anexo I), pues como hemos descrito antes, esta es la fuente de energía primaria que hace crecer la capa de mezcla durante el día. Sin embargo, también se puede ver que incluso en los meses fríos del año existe una gran variabilidad de la altura de la capa de mezcla. Por ejemplo, considerando los datos desde mayo hasta agosto, si bien las alturas de la capa de mezcla a las 12 HL son típicamente entre 200 y 400 metros, su rango de variación va entre casi 0 m hasta 600 metros sobre el suelo. Esta variabilidad no puede explicarse solo por el factor energético, sino que se origina en los factores sinópticos que afectan el crecimiento de la capa de mezcla. En particular, la estabilidad atmosférica presente en la cuenca afecta en forma importante la tasa de crecimiento de la capa de mezcla diurna, por lo que, los días con mayor estabilidad presentarán en general un menor desarrollo de la capa de mezcla, y viceversa. La Figura 22 ilustra también la variación horaria de las distribuciones de altura de la capa de mezcla diurna en Santiago.

Figura 22. Climatología de alturas de capa de mezcla diurnas sobre Santiago derivadas de mediciones de nefobasímetro DGF. a) Diagramas de cajas de las distribuciones mensuales de alturas a la hora 12 HL. b) Diagramas de cajas de las distribuciones de alturas entre las horas 10 y 15 HL para los meses de mayo a agosto. c) Igual que b) pero para meses de noviembre a febrero.



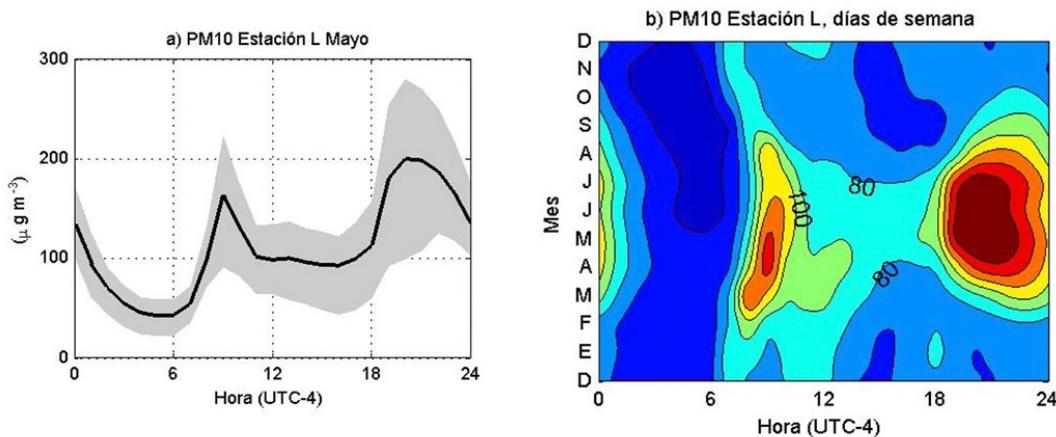
Fuente: adaptada de Muñoz y Undurraga (2010), con estadística actualizada al año 2012.

De la Figura 22 cabe aclarar que los diagramas de caja ilustran la distribución estadística de una variable mostrando la mediana (línea horizontal roja), los cuartiles inferior y superior (bordes de la caja), el rango (extremos de barbas segmentadas), y valores extremos (cruces rojas para datos que se alejan más de 1.5 vez el rango intercuartílico del cuartil superior o inferior).

7.1.2 Concentraciones

Los ciclos diarios de concentraciones de material particulado (MP) y su variación estacional se ilustran en la Figura 23. Si bien las concentraciones de contaminantes atmosféricos no solo dependen de las condiciones meteorológicas locales, sino también en buena medida de las tasas y patrones de emisiones, estas figuras sugieren que las condiciones meteorológicas ejercen un fuerte control en el caso de Santiago. El ciclo diario medio de MP10 muestra dos *conspicuos peaks* en la mañana y al inicio de la noche. A nivel estacional, las mayores concentraciones medias se observan en el periodo de abril a julio, especialmente asociadas a la intensificación de los *peaks* matinales y vespertinos. Podemos relacionar estas características con lo que hemos visto en las secciones previas acerca de la evolución de la capa límite atmosférica en la cuenca de Santiago. El *peak* de la mañana en las concentraciones de MP10 estaría relacionado con el inicio del periodo diurno en que la intensidad de la convección, y por tanto la mezcla vertical, es todavía débil, por lo que los contaminantes emitidos a esas horas no se diluyen en forma eficiente. A media tarde, en cambio, la capa de mezcla es mayor y las concentraciones se reducen. Con la puesta del sol y la formación de la capa límite nocturna el material particulado emitido cerca de la superficie nuevamente alcanza altas concentraciones. Lo extendido en el tiempo y la magnitud de este *peak* nocturno varían en las distintas estaciones monitoras de acuerdo con las emisiones locales, la dinámica de la transición vespertina y la intensidad de la estabilidad superficial y de los flujos superficiales nocturnos que se desarrolle en cada caso. La variación anual del comportamiento del MP10 está asociada a la variación anual de la radiación solar y de la estabilidad nocturna que hemos presentado antes.

Figura 23. a) Ciclo diario promedio de concentraciones de MP10 del mes de mayo medidas en estación L (La Florida) de la red monitora de calidad de aire de Santiago. Zona gris marca el rango intercuartílico de las concentraciones horarias. b) Diagrama de ciclos diario/anual de concentraciones de MP10 en estación L.⁸¹



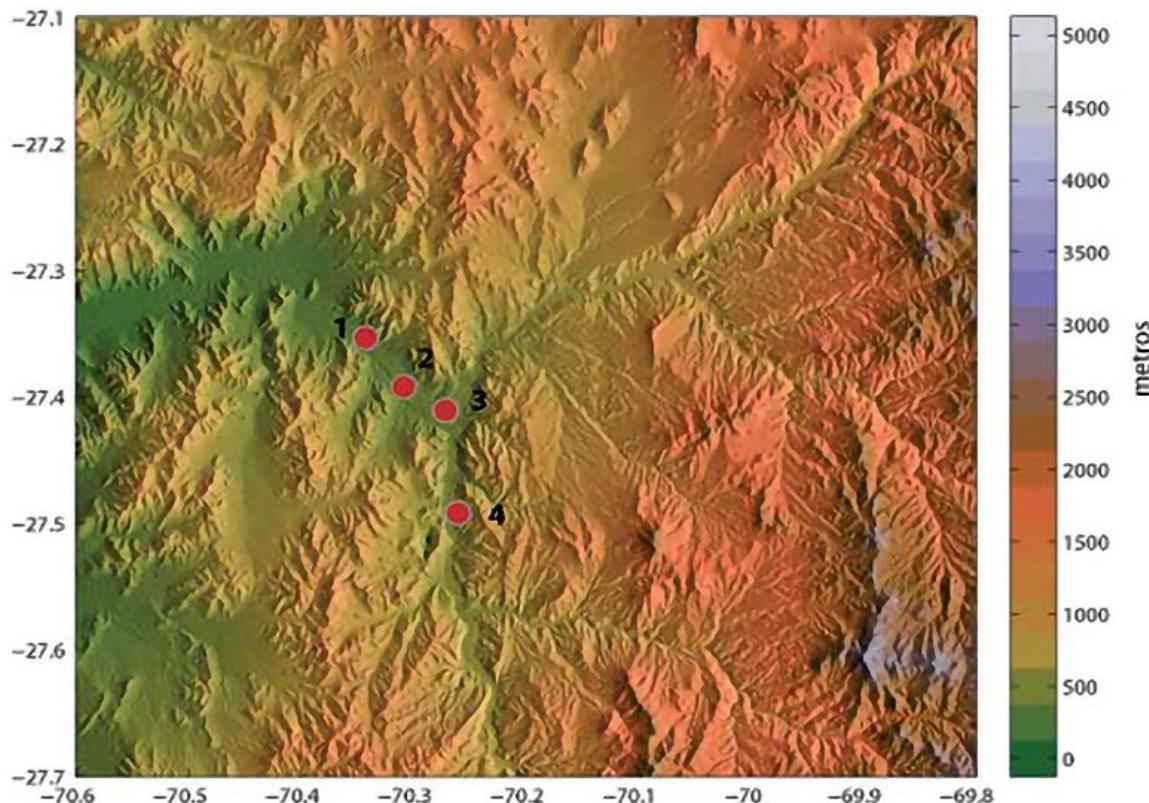
Fuente: adaptada de Muñoz (2012)

7.2 Valle de Copiapó (fuente de altura)

El valle de Copiapó, ubicado alrededor de los 27.3°S, es el más septentrional de los valles transversales del Norte Chico (Figura 24). En su interior, la fundición de cobre Hernán Videla Lira ubicada en la zona de Paipote emite SO₂ a través de una chimenea de 70 metros de altura, además de las emisiones fugitivas de superficie asociadas a sus procesos productivos. Una red monitora de calidad del aire y meteorología se emplaza a lo largo del eje del valle entre la ciudad de Copiapó y la localidad de Tierra Amarilla (Figura 24). En la región de interés el eje del valle pasa de una orientación NW-SE en la zona de Copiapó-San Fernando a una orientación marcadamente N-S en la zona de Tierra Amarilla, estando Paipote justamente en la zona donde el valle cambia su orientación.

⁸¹ En ambas figuras se consideró sólo días de semana en el periodo 1998-2010.

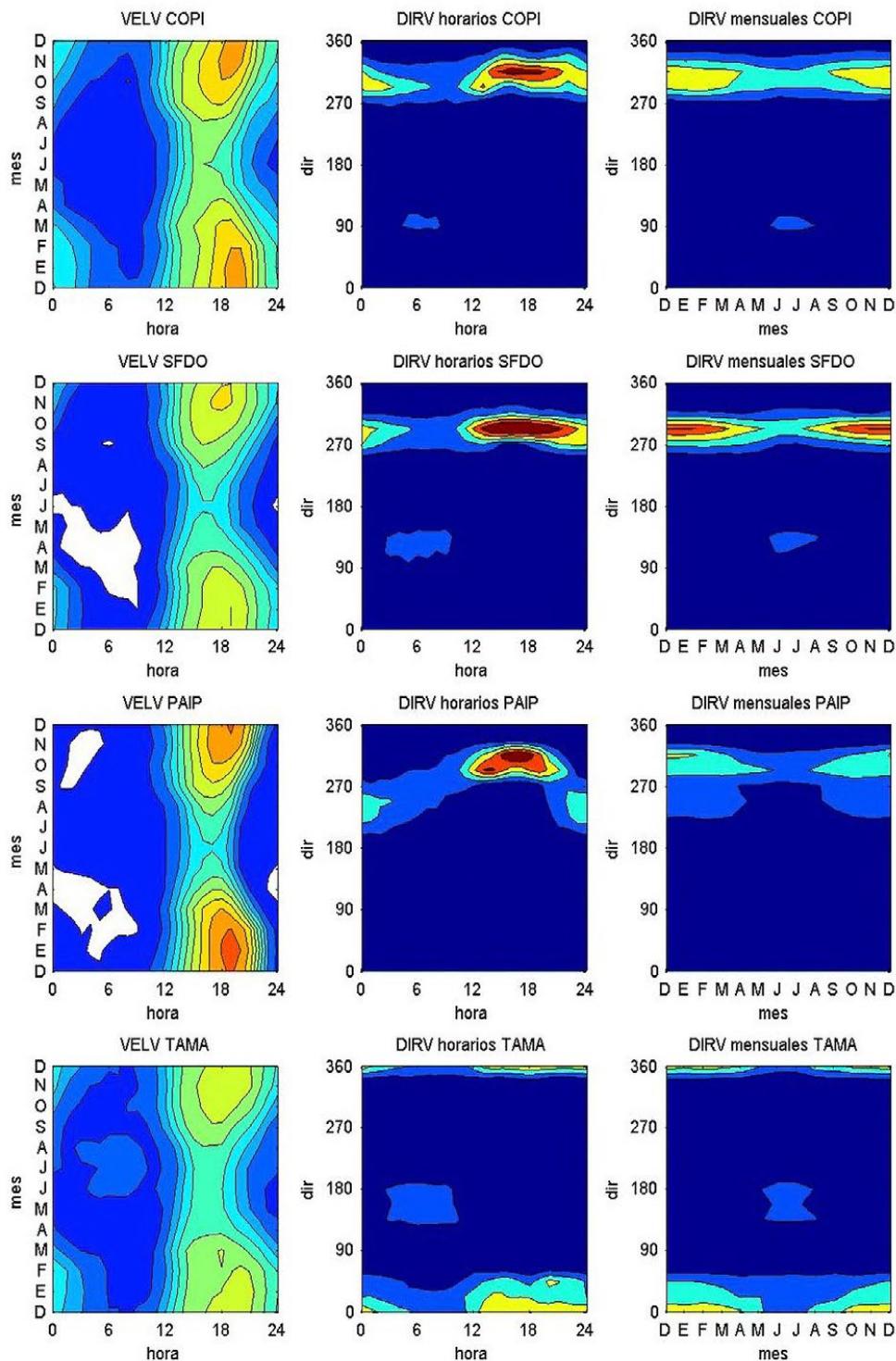
Figura 24. Topografía del valle de Copiapó. Contornos de línea de 200 a 900 m cada 100 m, contornos coloreados de 1.000 a 3.000 cada 250 m. Puntos rojos indican ubicación de las estaciones monitoras de Copiapó (1), San Fernando (2), Paipote (3) y Tierra Amarilla (4).



Fuente: elaboración propia

Los vientos superficiales en el valle muestran un marcado sistema de brisas de valle-montaña según se aprecia en la climatología de la velocidad y dirección del viento mostrada en la Figura 25. Las máximas magnitudes de la velocidad del viento se alcanzan al final de la tarde con direcciones valle arriba en las cuatro estaciones de medición. El régimen de viento nocturno se caracteriza por velocidades superficiales muy débiles y de dirección valle-abajo. En cuanto a la variación estacional, la magnitud de los vientos de la tarde y la persistencia de sus direcciones es mayor en los meses cálidos, mientras que el régimen nocturno de direcciones se refuerza aparentemente en los meses de invierno.

Figura 25. Climatología del viento superficial en el valle de Copiapó determinada a partir de datos horarios de años 2000 a 2003 disponibles en Muñoz et al. (2003).



Fuente: elaboración propia

La Figura 25 presenta el análisis de las estaciones Copiapó (COPI), San Fernando (SFDO), Paipote (PAIP) y Tierra Amarilla (TAMA) de la red de calidad de aire y meteorología de la Fundición Hernán Videla Lira de Enami. Paneles izquierdos muestran diagramas de ciclos diarios/anuales de la velocidad del viento con contornos a partir de 1 m/s cada 0.5 m/s. Paneles centrales (de la derecha) muestran variación horaria (mensual) de la frecuencia de ocurrencia de la dirección del viento.

La Figura 26 muestra los diagramas de ciclos diarios/anuales de SO₂ medidos en las cuatro estaciones monitores de calidad del aire. En general, las mayores concentraciones se dan al inicio de la mañana, con concentraciones medias que se maximizan en el entorno de la fuente emisora. Es posible que este aumento matinal esté asociado a un proceso de fumigación matinal de las emisiones en altura ocurridas durante la noche. Impactos promedios durante la noche solo se aprecian cerca de las emisiones, probablemente debido a las emisiones fugitivas de superficie durante el periodo de máxima estabilidad superficial (notar que, a diferencia del caso de Santiago, en el valle de Copiapó los procesos emisores probablemente no tienen una disminución significativa durante la noche). En cuanto a la variación estacional, llama la atención el régimen de impacto en Tierra Amarilla que se maximiza en los meses cálidos, lo cual podría deberse a que, junto con la fumigación, esta estación recibe el impacto del transporte valle arriba, el cual se intensifica en verano. En las restantes estaciones, los impactos promedio son máximos en invierno.

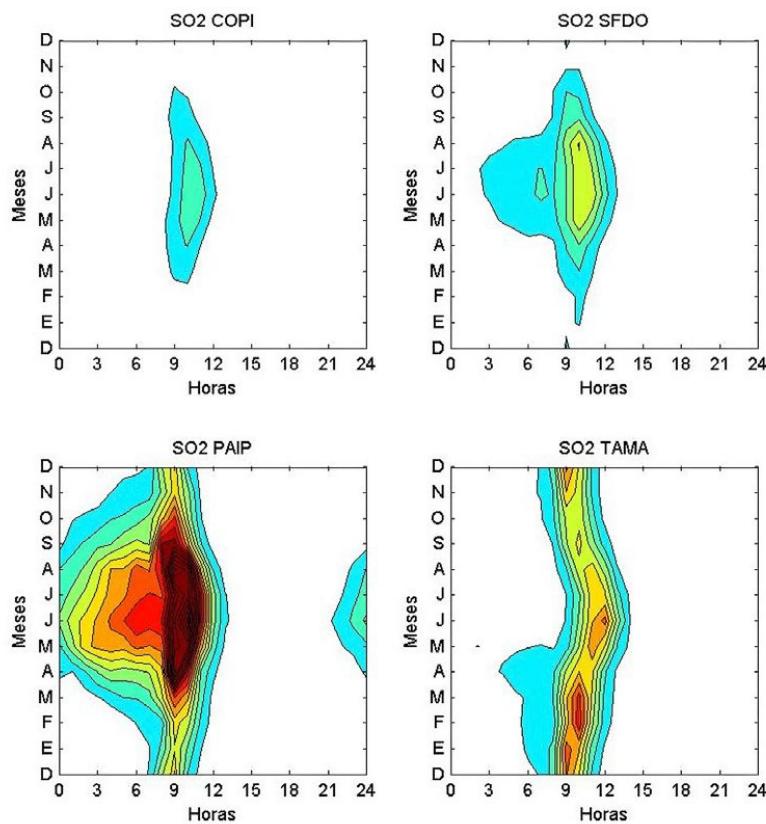
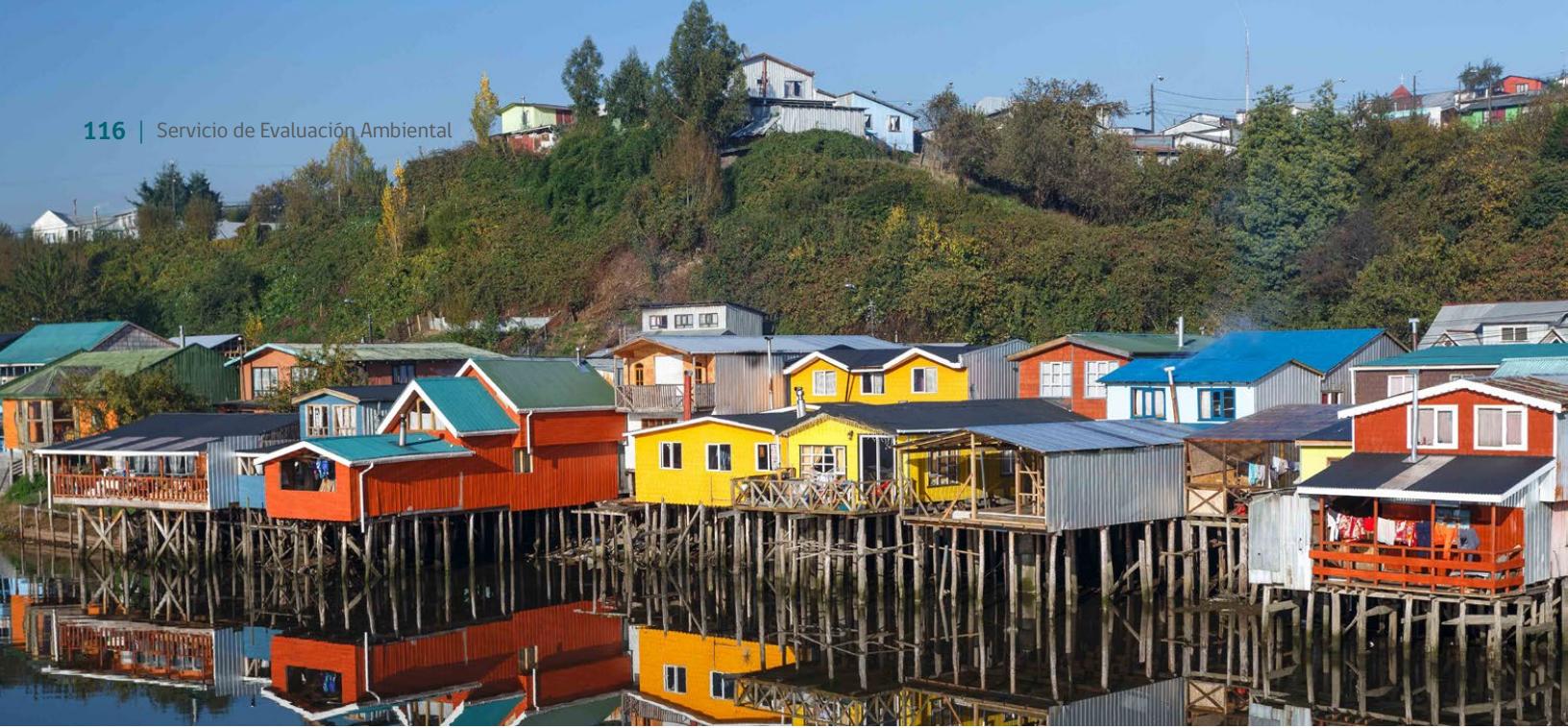


Figura 26. Diagramas de ciclo diario/anual de la concentración de SO₂ medida en las estaciones de la red de calidad de aire y meteorología de la Fundición Hernán Videla Lira de Enami⁸².

Fuente: elaboración propia

⁸² Los datos utilizados son los del 2000 al 2008, disponibles en sistema Sinca del Ministerio del Medio Ambiente. La escala de colores es la misma para todas las estaciones.



8. QUÍMICA ATMOSFÉRICA

8.1 Gases en la atmósfera

Los gases más abundantes en la atmósfera son el nitrógeno molecular, N_2 , (78.084%), el oxígeno molecular, O_2 , (20.946%), el argón, Ar, (0.934%) el dióxido de carbono, CO_2 , (0.046%) y el vapor de agua, H_2O , cuya abundancia es muy variable, pero en promedio contribuye cerca del 1% de la concentración en masa. Mientras que esos gases o son inertes o muy poco reactivos existen muchos otros cuyas concentraciones son muy bajas pero debido a su reactividad son fundamentales para la química atmosférica. Los elementos que componen la mayoría de esos gases son hidrógeno (H), carbono (C), nitrógeno (N), oxígeno (O), flúor (F), sulfuro (S), cloro (Cl) y bromo (Br). Aquellos gases que contienen cualquiera de estos elementos, incluyendo H y C pero no H y C juntos, se llaman gases inorgánicos. Los gases que contienen al mismo tiempo H y C (y pueden también incluir otros elementos) se llaman gases orgánicos. En lo que sigue se dan ejemplos de algunos gases inorgánicos y orgánicos junto con una breve descripción.

8.1.1 Gases inorgánicos

- **Nitrógeno molecular (N_2)**

Nitrógeno molecular es básicamente inerte en la atmósfera y su abundancia se explica por procesos biológicos en el suelo en que la producción a través del proceso de la desnitrificación es más rápida que el de la remoción a través de la fijación del nitrógeno molecular. Dada la diferencia en la velocidad de ambos procesos el nitrógeno molecular en la atmósfera se ha podido acumular en el tiempo.

- **Oxígeno molecular (O_2)**

Al contrario del nitrógeno molecular el oxígeno molecular sí participa en reacciones químicas en la atmósfera. Sin embargo, su abundancia se explica principalmente por la producción de la fotosíntesis de las plantas.

- **Vapor de agua (H_2O)**

La concentración de vapor de agua es muy variable en la atmósfera. En ambientes cálidos y sobre agua se encuentran concentraciones muy altas, mientras que en ambientes fríos y sobre el continente (por ejemplo, en los polos) las concentraciones son muy bajas. La mayor fuente de vapor de agua es la evaporación de agua sobre los océanos. Sin embargo, también la combustión de combustibles fósiles y otras reacciones químicas contribuyen a su producción. Su sumidero principal es la precipitación (líquida y sólida). El vapor de agua es muy importante en la química atmosférica ya que se requiere su presencia para la producción del radical hidroxilo (ver abajo).

- **Ozono (O_3)**

La palabra ozono tiene su origen en el verbo griego “ozein” que significa tener olor. Es un gas incoloro que presenta un olor aún a concentraciones muy bajas. Es un oxidante que puede tener un impacto irritante en el tejido mucoso lo que puede causar problemas en la garganta, los pulmones y los ojos. El ozono no se emite y su abundancia solo depende de reacciones fotoquímicas. Mientras en la tropósfera el ozono es uno de los contaminantes más importantes, en la estratosfera es, debido a sus características de absorbente, la sustancia clave para proteger los seres vivos de la radiación UV-B en la banda de los 280 a los 320 nm.

- **Nitrógeno oxigenado (NO_x)**

Se entiende como nitrógeno oxigenado a la suma del monóxido de nitrógeno, NO, y del dióxido de nitrógeno, NO_2 . El NO es emitido por el suelo, las plantas y los procesos de combustión y, además, tiene una fuente también significativa en relámpagos y reacciones químicas. En términos de la contaminación atmosférica en Chile, sus principales fuentes son el tráfico vehicular y las centrales termoeléctricas en que el NO contribuye aproximadamente a un 90% de los NO_x con un 10% de NO_2 . Mientras la fuente principal del NO son las emisiones, la fuente principal del NO_2 son las reacciones fotoquímicas.

- **Dióxido de azufre (SO_2)**

El dióxido de azufre es un contaminante que puede afectar el sistema respiratorio cuando está presente en concentraciones altas. Su fuente principal son las emisiones naturales de los volcanes junto con aquellas antropogénicas asociadas a la combustión de combustibles fósiles con un alto contenido de azufre (por ejemplo, el carbón o el Diesel).

- **Radical hidroxilo (OH)**

Cuando una molécula cuenta con un electrón libre se la denomina radical (o también radical libre). Uno de los radicales más importantes en la atmósfera es el radical hidroxilo. Su única fuente es la producción química. Una vez presente en la atmósfera el radical hidroxilo reacciona con muchos otros gases por lo que también se le denomina "detergente de la atmósfera".

- **Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro que es tóxico para los seres humanos en concentraciones muy altas. La fuente principal de monóxido de carbono es la combustión incompleta en vehículos livianos y pesados, aviones y en la quema de leña. Mientras el CO está involucrado en algunas reacciones químicas su contribución a aquellas importantes a nivel urbano o regional no es muy relevante.

8.1.2 Compuestos orgánicos volátiles

Los gases que contienen H y C (pudiendo también incluir otros elementos) se llaman gases orgánicos. Existe una variedad muy grande de esos gases orgánicos. Los gases orgánicos que contienen solo H y C son los hidrocarburos (por ejemplo, alkanos, alquenos, alquinos y aromáticos). Muchas veces también se refiere a los hidrocarburos no metánicos que son todos los hidrocarburos menos metano (que es poco reactivo). Los hidrocarburos que contienen grupos funcionales oxigenados se llaman hidrocarburos oxigenados e incluyen los aldehídos, cetonas, alcoholes, entre otros. Los hidrocarburos no metánicos junto con los hidrocarburos oxigenados se denominan gases orgánicos reactivos o compuestos orgánicos volátiles (COVs). A continuación, se describen el metano y los COVs más relevantes para la contaminación atmosférica.

- **Metano, CH₄**

El metano es el hidrocarburo más abundante en la atmósfera. Sus fuentes principales son tanto las emisiones por bacterias que lo producen en ambientes anaeróbicos, como por ejemplo los cultivos de arroz, pero también en los tractos digestivos de animales de la ganadería masiva como también su producción a través de reacciones químicas. Las reacciones químicas que a su vez involucran metano son generalmente muy lentas e irrelevantes para la contaminación a nivel urbano y regional (no obstante, el metano es uno de los gases de efecto invernadero más importantes).

- **Alcanos**

Los alkanos son hidrocarburos que se caracterizan por sus enlaces entre los átomos de carbono que son exclusivamente simples. El alcano más sencillo es el metano con un solo átomo de carbono. Otros alkanos importantes en la contaminación atmosférica son el etano, propano y el butano con dos, tres y cuatro átomos de carbono, respectivamente. A partir de cinco carbonos, los nombres se derivan de numerales griegos: pentano, hexano, heptano, octano, etc. También existen cicloalcanos que tienen forma de anillos y, por lo tanto, cuentan con un mínimo de tres átomos de carbono.

- **Alquenos**

A contrario de los alkanos, los alquenos contienen uno o más enlaces dobles entre átomos de carbono. Esto implica que el alqueno más sencillo posible es el eteno. Equivalente a los alkanos, los alquenos que siguen son el propeno, buteno, penteno, etc., y también existen alquenos cíclicos. Las fuentes más importantes de los alkanos y alquenos son el parque vehicular, fugas de gas licuado, las refinerías, entre otras.

- **Aromáticos**

Los aromáticos son hidrocarburos que tienen como estructura base un anillo de seis átomos de carbono con tres enlaces dobles y tres enlaces simples. Esa estructura base es el benceno. Otros aromáticos importantes son los que cuentan con un grupo de metilo (un átomo de carbono junto con tres de hidrógeno, CH₃) que es el tolueno o dos grupos de metilo que es el xileno. Los aromáticos son tóxicos y, además, por su alta reactividad juegan un papel importante en la formación de ozono.

- **Isopreno**

El isopreno es el hidrocarburo biogénico más importante. Su fórmula es 2-metilo-1,3-butadieno. Es altamente reactivo y, por lo tanto, en zonas de mucha vegetación puede ser clave en la formación de ozono.

- **Aldehídos**

Al contrario de todos los hidrocarburos anteriormente mencionados, los aldehídos son hidrocarburos oxigenados que se caracterizan por su grupo funcional -CHO. El aldehído más sencillo es el formaldehído (HCHO). También importantes en el contexto de la contaminación atmosférica son el acetaldehído (CH₃CHO) y el propinaldehído (C₂H₅CHO). Las fuentes principales de los aldehídos son las emisiones de solventes y pinturas, pero también su producción a través de las reacciones químicas.

8.2 Reacciones químicas

Muchos de los gases anteriormente expuestos participan en reacciones químicas en la atmósfera. Dado que muchas de esas reacciones son gatilladas por radiación solar a través de la interacción de fotones y moléculas, también se refiere a la química atmosférica como la fotoquímica. Sin embargo, aparte de esa interacción de fotones y moléculas existe una gran variedad de otros tipos de reacciones de las cuales las más importantes son la fotólisis, las reacciones colisionales bimoleculares y las reacciones termoatómicas.

- **Fotólisis**

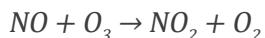
La fotólisis (también reacción fotolítica o fotodisociación) es una reacción en que el impacto de un fotón con una molécula es tal, que es capaz de romper los enlaces químicos de esa molécula y formar dos moléculas nuevas. Un ejemplo para una reacción de ese tipo es la fotólisis del NO₂ que produce NO y oxígeno atómico (O):



En el caso de la fotólisis del NO₂ son los fotones del espectro menor de la longitud de onda, λ menor 420 nm, que cuentan con la energía suficiente para romper la molécula del NO₂ (a menor longitud de onda, más energético un fotón). Cada reacción fotolítica cuenta con un rango de longitudes de onda específico que a su vez depende de la estructura de la molécula.

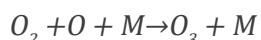
- **Reacciones colisionales bimoleculares**

Las reacciones colisionales bimoleculares son las reacciones más típicas en la atmósfera. En ellas, debido a su energía cinética dos moléculas reactivas se acercan y reaccionan para formar una o más moléculas nuevas. Un ejemplo de este tipo de reacción es la reacción de NO con O₃ para formar NO₂ y O₂:



- **Reacciones termoatómicas**

Las reacciones termoatómicas son reacciones en que dos moléculas reaccionan para formar una molécula nueva. A diferencia, sin embargo, de las reacciones bimoleculares, se requiere una tercera molécula, para transferir la energía de exceso que conlleva la producción de la molécula nueva. Un ejemplo de este tipo de reacción es la formación de ozono a través de la reacción de oxígeno molecular con oxígeno atómico:



M en este caso podría ser cualquier molécula en la atmósfera y que es, debido a su abundancia, generalmente N_2 o O_2 . En esta reacción, lo que primero se forma es un O_3 con un exceso de energía. Esta energía puede causar la disociación de O_3 de nuevo a O_2 y O si no puede transferirla a una tercera molécula M resultando en O_3 sin energía en exceso y, por lo tanto, más estable. Debido que M representa a todas las moléculas en la atmósfera su concentración es proporcional a la presión atmosférica y, en consecuencia, la cinética de la reacción depende de la presión.

8.3 Cinética química

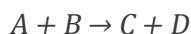
El estudio sobre la velocidad en que ocurren las reacciones químicas se llama cinética química. En forma cualitativa ya se ha mencionado la cinética química en la sección anterior; por ejemplo, se decía en el caso del metano que sus reacciones eran demasiado lentas para jugar un papel en la contaminación atmosférica urbana. Y es justamente ese análisis de la velocidad de las reacciones que permite evaluar la importancia de una reacción bajo ciertas condiciones. En este sentido, la cinética química evalúa para cada reacción la tasa o velocidad a la que ocurrirá la reacción. Consideremos una reacción fotolítica según:



En este caso, la producción de C y D depende de la concentración de A y de la tasa de reacción. La tasa de reacción tiene la unidad $1/s$ y su valor promedio (promedio en todo el rango de longitud de onda relevante) se entrega a través del llamado coeficiente de tasa de reacción. En el caso de reacciones fotolíticas se ocupa la letra j para este coeficiente y su unidad también es $1/s$. De esta manera, se puede calcular ahora la producción de C (y de D) como la concentración de A multiplicado por j ; si A se expresa en concentración, la unidad de la producción de C (y de D) sería $\mu\text{g}/\text{s}$ o, si A se expresa en una razón de mezcla, ppb/s . Análogamente, la tasa de la pérdida de A es igual a la tasa de producción de C (y de D) y tiene la misma unidad.

Las reacciones fotolíticas son claves en la activación de toda la química atmosférica. En este sentido, una estimación exacta de j es muy importante. j depende fundamentalmente de la radiación que llega a una molécula (directamente del sol, por reflejo de la tierra o por dispersión en la atmósfera) y la interacción entre la radiación y la molécula que, a su vez, es específica para cada longitud de onda y la geometría de la molécula.

En el caso de las reacciones bimoleculares, se ocupa la letra k para el coeficiente de la tasa de reacción. Consideremos una reacción bimolecular según:



En este caso, la producción de C y D depende de las concentraciones de A y B y del coeficiente de la tasa de reacción k . Así que las unidades de k son $1/(\mu\text{g}/\text{s})$. De esta manera, y en este

caso, se puede evaluar la producción de C (y de D) como la concentración de A multiplicada por la concentración de B y por k también en la unidad de µgr/s. Análogamente, la tasa de la pérdida de A (y de B) es igual a la tasa de producción de C (y de D) y tiene la misma unidad.

8.4 Fotoquímica de la tropósfera

La química de la tropósfera tiene características fundamentalmente distintas a aquella de la estratosfera. Mientras el agujero de ozono es un fenómeno de la estratosfera y un ejemplo (si no el más importante) de cómo la química atmosférica puede llegar a la conciencia pública, no es parte del enfoque de este texto profundizar sobre este tema sino sobre aquellos fenómenos químicos que ocurren cerca de la superficie y por lo tanto son característicos de la tropósfera.

Si bien la química de la tropósfera dista por mucho de la estratosfera, ambas tienen en común que la sustancia de principal interés es el ozono. En lo que sigue se describen entonces los conceptos fundamentales de cómo se produce y remueve el ozono en la tropósfera y cuáles son los roles de los óxidos de nitrógeno y de los compuestos orgánicos volátiles en esos procesos. Un buen punto de partida para esa descripción es el ciclo NO_x/O_3 que involucra la reacción que produce ozono (la única significativa) y, además, destaca el rol fundamental de los NO_x en este contexto.

- **El ciclo NO_x y O_3**

En presencia de radiación solar, el ciclo NO_x/O_3 es el siguiente:



El ciclo comienza de la fotólisis del NO_2 que produce NO y oxígeno atómico (O). La reacción de O con O_2 es la reacción en la atmósfera que produce O_3 (dentro de esta reacción se requiere una tercera molécula para absorber energía vibracional y, de esta manera, estabilizar la molécula de ozono). Finalmente, los productos de las primeras dos reacciones, NO y O_3 , pueden reaccionar y producen NO_2 . En las tres reacciones se indican sus tasas de reacción j_1 , k_2 y k_3 , respectivamente.

Este ciclo ocurre en todas partes de la tropósfera y es fundamental para entender el comportamiento del ozono. Se puede ver que dentro del ciclo NO_x/O_3 no hay producción ni pérdida de ninguna de las sustancias involucradas (es decir, cada una de ellas aparece una vez al lado izquierdo y derecho, respectivamente). Una manera simple de estimar la

concentración de ozono que sería capaz de producir este ciclo es a través de un análisis del estado estacionario, en el que se supone que dentro de un sistema químico se establece un equilibrio entre la formación y la destrucción de O_3 . Ocupando ese concepto, y a través de algunas operaciones algebraicas, se puede mostrar que la concentración del ozono en ese estado estacionario, $[O_3]$ se puede expresar como⁸³:

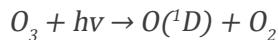
$$[O_3]_{es} = \frac{j_1[NO_2]}{k_3[NO]}$$

Esta expresión se llama también la relación del estado fotoestacionario y muestra que la concentración del ozono bajo las suposiciones de su derivación es proporcional a la razón de las concentraciones de NO_2 y NO , es decir, si esta razón aumenta/disminuye también aumenta/disminuye la concentración de ozono.

Si bien el ciclo NO_x/O_3 es fundamental para la fotoquímica, no es capaz de producir las concentraciones de ozono que se observan en la tropósfera (de hecho, es capaz de producir concentraciones muy inferiores a las reales). De esta manera, se requieren reacciones adicionales, capaces de perturbar ese ciclo, aumentar la razón entre NO_2 y NO y, en consecuencia, aumentar las concentraciones de ozono. Sin embargo, antes de estudiar esas reacciones se considera oportuno poner atención a una sustancia que tiene un rol muy importante en muchas de ellas. Esa sustancia es el radical hidroxilo que se describe a continuación.

- **Radical hidroxilo**

La reacción responsable de gatillar muchas de las reacciones en la tropósfera es la fotólisis de O_3 que produce un átomo de oxígeno electrónicamente excitado $O(^1D)$:



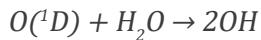
El $O(^1D)$ tiene dos caminos en que puede reaccionar; en un 90% de los casos se remueve su energía en exceso a través de una colisión con otra molécula y llega nuevamente a su estado base:



En este caso O reacciona rápidamente con O_2 para formar nuevamente O_3 , de tal manera que esta reacción se puede considerar una reacción nula.

⁸³ Los paréntesis cuadrados indican las concentraciones de una sustancia.

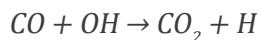
En el 10% restante O(¹D) reacciona con vapor de agua y produce 2 moléculas del radical hidroxilo.



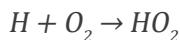
Mientras que el OH no reacciona con los dos gases más abundantes de la atmósfera, sí oxida la mayoría de los gases trazas, principalmente los COVs. Por esta capacidad oxidativa frente a los gases traza, también se refiere al OH como el detergente de la atmósfera. El gas más simple para mostrar el rol del OH en la producción de ozono es el monóxido de carbono (CO).

- **Monóxido de carbono**

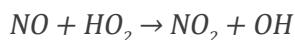
El OH oxida CO y produce dióxido de carbono (CO₂) y un átomo de hidrógeno H:



H a la vez es muy reactivo y reacciona rápidamente con O₂ para formar el radical hidroperoxilo HO₂:

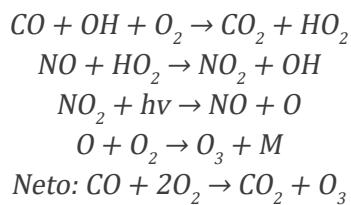


HO₂ nuevamente es un radical y, por lo tanto, muy reactivo. En presencia de NO su reacción más importante es la conversión de NO a NO₂:



Esta reacción es importante en dos sentidos: primero, la conversión de NO a NO₂ significa un cambio en la relación de estado foto-estacionario (ver arriba) y, segundo, es la reacción que recicla el OH que puede actuar nuevamente en la oxidación de otro gas traza.

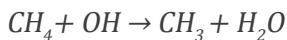
Las reacciones anteriormente descritas se pueden escribir ahora en forma resumida según:



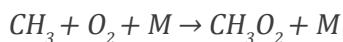
Es decir, la oxidación de un CO produce un O₃ (y un CO₂). Dentro de estas reacciones, los radicales OH y HO₂ no se producen ni se consumen de tal manera que la cadena se puede considerar una oxidación catalítica de CO a CO₂ y que, además, produce O₃.

- **Metano**

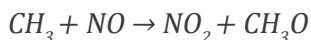
Mientras el CO es el gas más simple con carbono, el hidrocarburo más simple es el metano CH₄. Consideremos entonces ahora cómo el CH₄ contribuye a la producción de O₃. Nuevamente la cadena de reacción comienza con la oxidación del CH₄ a través de OH que produce el radical metilo CH₃ y agua:



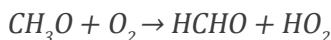
En una reacción termolecular, CH₃ reacciona rápidamente con O₂ y produce el radical metilo-peroxilo CH₃O₂:



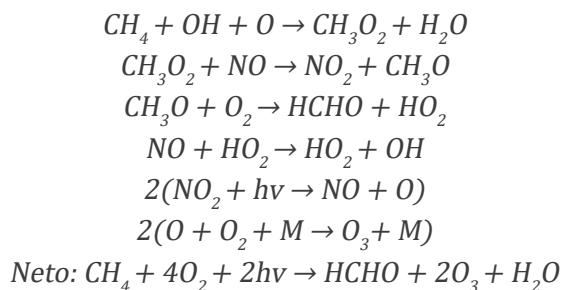
Una de las reacciones importantes de CH₃O₂ es aquella con NO que produce NO₂ y el radical metoxi CH₃O:



Finalmente, la reacción más importante para CH₃O es con O₂ en que se produce formaldehído HCHO y HO₂:



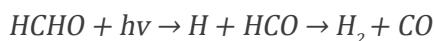
En forma resumida, la cadena de oxidación del CH₄ es entonces:



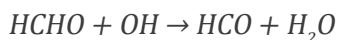
Entonces la oxidación de un CH₄ resulta en la producción de dos O₃, es decir, siendo algo más complejo en su estructura, la oxidación del CH₄ produce dos veces más O₃ que el CO. Además, el otro producto de la cadena oxidativa del CH₄, el HCHO, sigue produciendo O₃ tal como se describe a continuación.

- **Formaldehído HCHO**

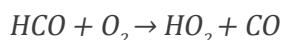
HCHO puede ser emitido directamente a la atmósfera o producido a través de la oxidación de otros hidrocarburos (tal como se ha visto en el ejemplo de la oxidación de CH₄). HCHO a su vez cuenta principalmente con dos reacciones; la primera es su fotólisis que puede producir H y el radical formilo HCO o, como segunda opción, H₂ y CO (ambos caminos ocurren aproximadamente con un 50% de probabilidad):



La segunda reacción es su oxidación a través del OH que también produce HCO y, además, H₂O:



HCO rápidamente reacciona con O₂ y produce HO₂ y CO:



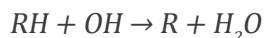
Entonces el primer camino de la fotólisis produce 2 HO₂ por cada molécula de HCHO (ya hemos visto en el caso de la oxidación de CO que H reacciona con O₂ para producir HO₂). Dado que el segundo no produce ninguno, se puede decir que la fotólisis del HCHO en promedio produce un HO₂ tal como lo hace también su reacción con OH; o sea un HCHO produce un HO₂ y, por lo tanto, un O₃. De esta manera, se puede ver que la cadena de la oxidación de los hidrocarburos sigue a través de aquella de sus aldehídos (que en el caso del CH₄ es el formaldehído HCHO).

Por sus estructuras relativamente simples se han considerado el CO y el CH₄ (y su producto HCHO) para ejemplificar la oxidación de algunos gases traza a través del OH. Sin embargo, tanto el CO como el CH₄ reaccionan muy lentamente en la atmósfera, o sea su contribución a la producción de O₃ no es significativa a nivel urbano o regional (sí a nivel global que, sin embargo, no es el foco de este texto). De esta manera, consideremos ahora la oxidación de moléculas más complejas que son claves para la producción de ozono justamente a la escala urbana y regional, que son los hidrocarburos no-metánicos.

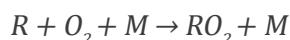
- **Hidrocarburos no-metánicos (HCNM)**

Existen miles de HCNM en la atmósfera que a su vez están involucrados en millones de reacciones químicas; es imposible dar una descripción de todos ellos y sus respectivas reacciones. En consecuencia, en lo que sigue se describirá el esquema general en que reaccionan los HCNM, seguido por una breve explicación de en qué se distinguen los distintos HCNM dentro de este esquema.

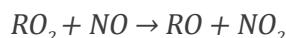
Los HCNM son, generalmente, estructuras complejas de átomos de carbono e hidrógeno. En la nomenclatura química esas estructuras se representan a través de RH, donde el H representa uno de los átomos de hidrógeno, y R el resto de la estructura. Y tal como en los casos anteriores, la cadena de oxidación empieza con la reacción de los RH con el OH que forma un radical alquilo R y H₂O (o sea una abstracción de un átomo de H del RH):



R reacciona de manera muy rápida con O₂ para formar un radical alquilo-peroxilo:



En una reacción también rápida, RO₂ convierte NO a NO₂ y, además, produce un radical alcoxi (RO):



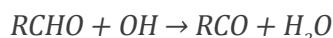
El primer producto intermedio estable en esta cadena es un aldehído RCHO a través de la reacción de RO con O₂ que produce también un HO₂:



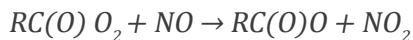
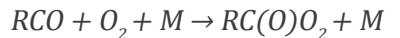
Ya hemos visto como el HO₂ convierte NO a NO₂ y, además recicla el OH.

Cabe recapitular la oxidación de CH₄ en este punto, que sigue exactamente el mismo patrón y en el cual CH₄ es el RH (con R≡CH₃ donde R representa un átomo de C) y su oxidación llega hasta la producción del más simple de los aldehídos, el formaldehído HCHO. Al contrario del formaldehído, que produce a través de unas pocas reacciones CO, los aldehídos más complejos siguen en la cadena de reacción, cuyo largo depende del número de átomos de carbono que contiene.

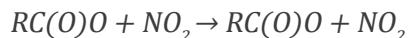
Tal como fue el caso del HCHO, los RCHO también pueden ser emitidos directamente a la atmósfera o, tal como lo ha indicado la última reacción, pueden ser producidos químicamente. Y tal como todos los COVs, su reacción principal a la vez es a través del OH que produce un radical alquilo RCO y H₂O:



El RCO reacciona rápidamente con O₂ para formar el radical alquilo-peroxi que, tal como ya se ha visto en los casos de los otros dos tipos de radicales peroxy (HO₂ y RO₂), transforma NO a NO₂ y produce, además, RCO(O)O:



Finalmente, el $RC(O)O$ reacciona con O_2 para nuevamente producir RO_2 ; sin embargo, este RO_2 tiene un átomo de carbono menos ya que también se produce un dióxido de carbono.



Es decir, hasta la extracción de un átomo de carbono se produce en la cadena de oxidación de RH tres radicales peroxylos (RO_2 , HO_2 y $RC(O)O_2$) y cada uno de ellos transforma NO a NO_2 , lo que tiene como consecuencia la producción de tres moléculas de O_3 hasta ese punto por cada molécula de RH. Sin embargo, el RO_2 que se produce en esa instancia de la cadena, sigue en la cadena y, por lo tanto, sigue produciendo O_3 .

- Reacciones de terminación**

En presencia de NO_x y COVs en la atmósfera, al parecer las reacciones anteriormente expuestas podrían seguir actuando infinitamente. Sin embargo, hay otras reacciones que compiten con ellas y que son las responsables de que se quiten NO_x y radicales del sistema. Una de ellas es la reacción entre OH y NO_2 que produce ácido nítrico HNO_3 :



Esta reacción le quita al sistema un radical y un NO_x y, además, produce ácido nítrico que contribuye al nitrato en los aerosoles. La transferencia del HNO_3 a la fase líquida de los aerosoles es un proceso bastante eficiente y, por lo tanto, esta reacción generalmente es un sumidero de radicales y NO_x . La mayoría de las otras reacciones importantes de terminación involucra dos radicales peroxylos que pueden ser del mismo tipo o de tipos distintos. Estas reacciones siempre le quitan al sistema dos radicales y sus productos son generalmente sumideros de esos radicales.

- Los distintos tipos de COVs y su rol en la producción de O_3**

Es evidente entonces el rol que tienen los COVs (los hidrocarburos y los hidrocarburos oxigenados) en la producción del O_3 . También es evidente que, generalmente, mientras más larga la cadena de carbono, más ozono se puede producir ya que la cadena de oxidación sigue funcionando mientras haya átomos de carbono que se pueden extraer. Por el otro lado, también es importante la velocidad a la que un COV pueda producir ozono. Esta velocidad depende de la reactividad de un COV con el radical OH. En este sentido y como primera aproximación, se puede decir que cuanto más compleja es la estructura de un COV más reactivo será. Por ejemplo, los alquenos son más reactivos que los alkanos y los aromáticos (que contienen doble enlaces como los alquenos, pero su cadena tiene

forma de un anillo) son más reactivos que los alquenos. Finalmente, la ubicación en donde se produce el máximo de ozono a partir de una fuente de COV (en el caso de una fuente hipotética y única con un solo COV) depende tanto del largo de la cadena de ese COV como de su reactividad. Sin embargo, en la realidad nunca nos encontramos con fuentes únicas y siempre con una mezcla de COVs y fuentes múltiples de NO_x, lo que hace necesario el uso de modelos para estimar la distribución espacial y temporal del O₃.

8.5 Material particulado

El material particulado (MP) está relacionado a los aerosoles atmosféricos, que se definen como partículas (sólida o líquida o una mezcla de ambas) en un gas (en el caso de la atmósfera, en el aire). Mientras la parte líquida de los aerosoles es importante para muchos procesos químicos y fisicoquímicos, lo que se mide en las redes de monitoreo es sólo la parte sólida que justamente se conoce con el término material particulado. Al contrario de los contaminantes gaseosos que se pueden definir y describir a nivel molecular, el MP representa una mezcla de muchas sustancias que a su vez pueden tener orígenes muy distintos. Sin embargo, el monitoreo de las redes sanitarias o de vigilancia sólo mide concentraciones de MP sin ninguna caracterización más detallada del mismo (a nivel científico se realizan mediciones más detalladas, pero el costo de ellas es demasiado elevado, lo que no permite implementarlas dentro de una red de monitoreo). A continuación, se elaboran algunos conceptos fundamentales de la caracterización del MP en términos de a) su distribución por tamaño y b) su composición química junto con los procesos relacionados.

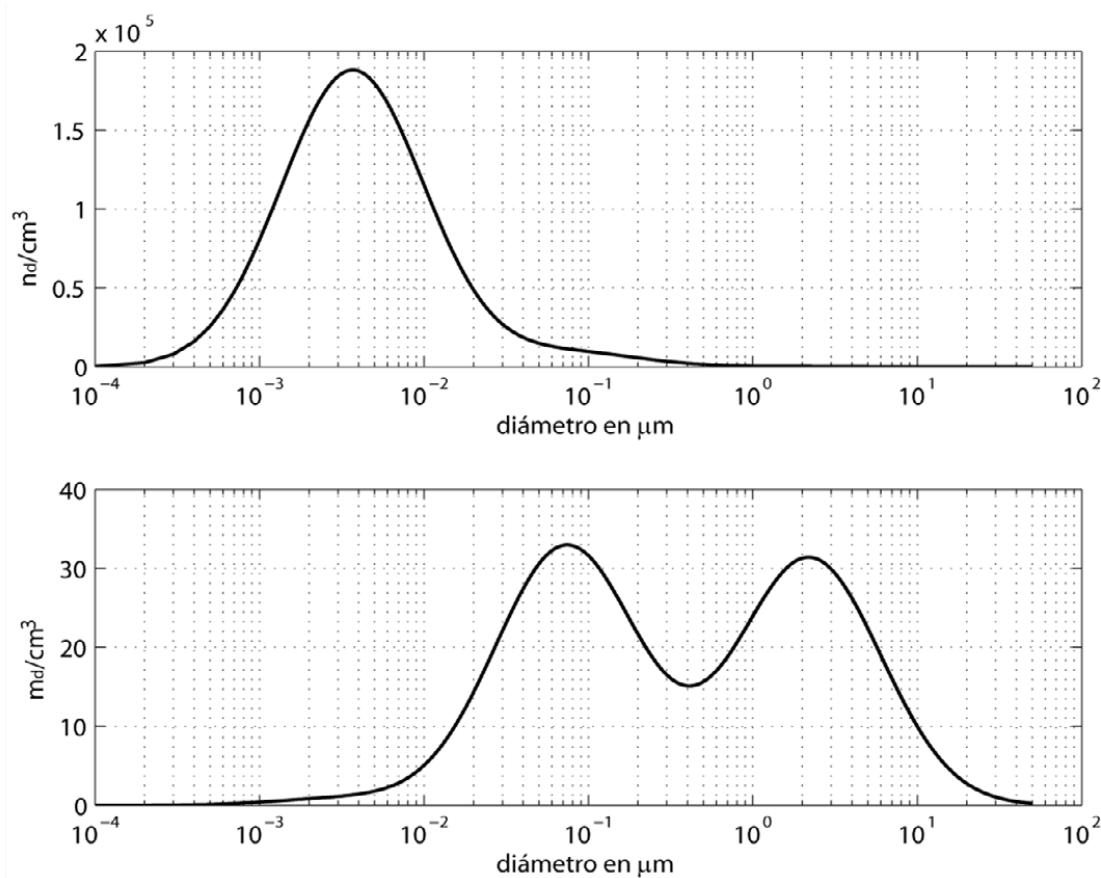
8.5.1 Distribución por tamaños

La Figura 27 muestra una distribución de tamaño de aerosoles típica para condiciones urbanas. En ambos paneles se indica la distribución de la misma muestra, pero en dos formas distintas: en el panel superior se indica la distribución por tamaño en función del número de partículas de un cierto diámetro (número por volumen, nd) y en el panel inferior la distribución por tamaño en función de la masa (masa por volumen, md). La distribución es en ambos casos trimodal, sólo que aparecen y desaparecen los modos según la manera en que se presenta la distribución. Mientras nd es una función del diámetro (d), md es una función de d^3 lo que explica la diferencia en la forma de ambas distribuciones: si bien existen muchas partículas muy pequeñas, su masa es baja (lo que se refleja en un primer modo superior a los dos siguientes en la distribución por número, y un primer modo muy inferior a los dos siguientes en la distribución por masa). Por el otro lado, hay mucho menos partículas grandes en términos de número, pero su masa contribuye mucho más que muchas pequeñas partículas.

También se puede ver en la Figura 27 que el eje x está graficado en forma logarítmica. Además, la distribución multimodal (en este caso existen tres modos) se podría representar por una

superposición de tres distribuciones log-normales (se llama distribuciones log-normal a aquellas que tienen la forma de una distribución normal en una escala logarítmica). De hecho, cada una de esas tres distribuciones log-normales tiene su origen en distintos procesos fisicoquímicos, los que se describen a continuación.

Figura 27. Distribución por tamaño del material particulado. El panel superior muestra la distribución de números de partículas, mientras el de abajo aquella de la masa de las partículas.



Fuente: elaboración propia

8.5.2 Procesos fisicoquímicos

En primer lugar, existe el proceso de nucleación que es la transición de ácido sulfúrico H_2SO_4 desde la fase gaseosa a la fase líquida sin presencia de núcleos de condensación; es decir, el H_2SO_4 tiene la capacidad de formar espontáneamente muy pequeñas gotas sin la necesidad de una superficie para la condensación. La nucleación es un proceso que contribuye a un cambio en la distribución y a un aumento de masa. De hecho, es el proceso responsable de la existencia del primer modo de la distribución que justamente por esta razón también se llama modo de nucleación.

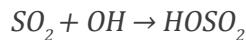
El segundo modo se denomina modo de acumulación. Los procesos responsables para este modo son la coagulación y la condensación. La coagulación representa el proceso en que dos partículas se juntan y forman una sola. En consecuencia, la coagulación no contribuye a la masa de las partículas sino sólo tiene un impacto en la distribución por tamaño. Generalmente, el proceso de coagulación permite que partículas frescas del modo de nucleación lleguen —debido a su crecimiento por ese proceso— al modo de acumulación. Por otro lado, la coagulación tiene ciertos límites y en general las partículas no llegan a un tamaño mayor que aquel representado por el segundo modo de la distribución y se acumulan en este (de ahí viene también su nombre). El segundo proceso relevante para este modo es la condensación que describe el proceso en que un gas condensa en la superficie de una partícula existente. En consecuencia, la condensación contribuye a un cambio de masa como un cambio de la distribución por tamaño. Nuevamente, este proceso representa un papel importante principalmente en la dinámica de los primeros dos modos y tiene como resultado que las partículas crezcan y se acumulen en el modo de acumulación.

No hay procesos fisicoquímicos importantes para el último modo de la distribución. Generalmente, se trata de partículas de mayor tamaño que son emitidos directamente a la atmósfera y removidos a través de procesos de deposición (ver numeral 9 en el Anexo I). Justamente por el tamaño de las partículas presentes que contiene, este modo se llama modo grueso.

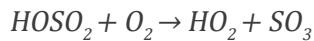
Mientras en la realidad la distribución por tamaño aún puede ser más compleja y menos suave de lo que se ve en la Figura 27, en la práctica se hace una diferenciación mucho más simple y se distingue entre MP de diámetro menor de $2.5\text{ }\mu\text{m}$ (MP2.5) y MP de diámetro menor de $10\text{ }\mu\text{m}$ (MP10). Al MP2.5 se refiere también a la fracción fina y a la diferencia entre MP10 y MP2.5 se llama la fracción gruesa del MP; es decir, el MP10 representa la suma de las fracciones fina y gruesa.

8.5.3 Composición química del material particulado

Tal como la fase gaseosa de la atmósfera, el MP también se caracteriza por una química de gran complejidad y que, además, cuenta generalmente con una contribución muy significativa de origen antropogénico. Con fines de simplificar, se puede dividir la química del MP en su parte inorgánica y la orgánica. A la parte inorgánica contribuyen principalmente sulfato (SO_4^{2-}), amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y metales trazas. La fuente principal de sodio y cloruro es la sal marina y, por lo tanto, se trata de MP primario (primario en el sentido que se emite directamente a la atmósfera) tal como es el caso también para los metales trazas. En el caso de sulfato, amonio y nitrato se trata de MP secundario (existen fuentes de sulfato primario, principalmente los océanos, que no son de interés en la contaminación atmosférica urbana en Chile). Todo el MP secundario se caracteriza por generarse a través de reacciones en la fase gaseosa seguido por la transferencia de los gases a la fase líquida. En el caso del sulfato son tres reacciones, a partir de su gas precursor SO_2 que resultan en su producción; la primera reacción nuevamente involucra OH:



Seguida por la reacción que regenera HO_2 (que, a la vez, tal como se mostró en la sección 8.4, recicla OH):



El trióxido de azufre, en presencia de vapor de agua, se convierte rápidamente en ácido sulfúrico H_2SO_4 :



Mientras el H_2SO_4 formado por esta reacción es un gas, se establece rápidamente un equilibrio entre su fase gaseosa y líquida (en los aerosoles). Las características de este equilibrio dependen de la humedad relativa del aire, pero generalmente el equilibrio es tal que casi la totalidad del H_2SO_4 está presente en forma líquida.

En presencia de amoníaco (NH_3) en el aire (NH_3 es un gas que se emite directamente a la atmósfera) éste neutraliza el H_2SO_4 en la fase líquida y se establece también un equilibrio en este caso entre el amoníaco en la fase gaseosa y el amonio en la fase líquida.

Finalmente, una de las reacciones terminales de la fotoquímica es la responsable de la formación de ácido nítrico HNO_3 :



Mientras el HNO_3 que se forma en esta reacción es un gas, también puede estar presente en forma de nitrato en la fase líquida.

En un aerosol real, siempre están presente los tres componentes sulfato, amonio y nitrato. Su composición exacta depende mucho tanto de las concentraciones de sus precursores en la fase gaseosa como de la abundancia de vapor de agua y agua líquido. Nuevamente, todo ese comportamiento es sumamente no-lineal y su estimación requiere el uso de modelos numéricos.

Mientras la parte inorgánica del MP, a pesar de su complejidad, es bastante conocida, todavía existen muchas incógnitas sobre la parte orgánica. Tal como en el caso de la parte inorgánica, también existe material orgánico primario y secundario. Sin embargo, la variedad de material orgánico primario es mucho mayor que la del material inorgánico; sus fuentes son por ejemplo quema de leña, frituras de carne, polvo de calles pavimentadas, polen, entre muchas otras. Es evidente que cada una de esas fuentes emite material orgánico muy distinto uno del otro. Efectivamente, existen cientos de compuestos orgánicos que componen el material orgánico. Sin embargo, la ciencia todavía no ha identificado el origen de todos estos compuestos.

Otro camino de producir material orgánico es a través de la transferencia de masa desde gases orgánicos de baja volatilidad a la fase líquida de los aerosoles. Esos gases son productos dentro de la cadena de oxidación de los COVs. Mientras en la sección 8.4 sólo se ha mostrado la oxidación de los COVs a través del radical OH, también existen reacciones en que los COVs son oxidados por parte de O_3 y NO_3 . Estos tres tipos de oxidación producen gases orgánicos de baja volatilidad que se acumulan en la atmósfera y eventualmente condensan en la superficie de un aerosol existente. Los COVs principales que se producen a través esos procesos de oxidación son los alcanos, alquenos (incluyendo los bio-alquenos) y los aromáticos. Cabe señalar también en este caso que la investigación de todos los procesos relevantes y su cuantificación es parte de la ciencia vigente y que ella está lejos de ser comprehensiva.

Finalmente, otra contribución al material particulado es el hollín que representa una mezcla entre carbono elemental y carbono orgánico (y algunos otros elementos en cantidades muy bajas). Su fuente son procesos de combustión, principalmente de Diesel y leña (o incendios), que lo producen y lo emiten directamente a la atmósfera.

9. PROCESOS DE DEPOSICIÓN

Los procesos por los que partículas y gases son removidos son la deposición seca y húmeda. La deposición seca es el proceso que describe el transporte de partículas y gases a la superficie terrestre en ausencia de precipitación. Existen muchos factores que determinan la eficacia de la deposición seca: la turbulencia atmosférica, las propiedades químicas de la partícula o el gas propiamente tal y, finalmente las propiedades de la superficie. Con fines de cuantificar se usa una analogía a la resistencia eléctrica en la que se relaciona el transporte de la deposición seca a la resistencia aerodinámica, casi-laminar y de superficie; esas resistencias justamente están asociadas a los factores mencionados.

El proceso responsable de que una parcela de aire llegue a la superficie terrestre es la turbulencia y, específicamente la turbulencia cerca de la superficie. La resistencia aerodinámica en este sentido es justamente inversamente proporcional a la intensidad de turbulencia. Es decir, mientras más estable la atmósfera menos resistencia existe y mayor el flujo desde niveles superiores hacia la superficie y viceversa. Este proceso es independiente del tipo de contaminante sino sólo una función de la meteorología.

El concepto de la resistencia casi-laminar asume que existe una capa muy delgada (del orden de un milímetro) sobre una superficie (hoja, tierra, agua, etc.) en que el flujo se puede asumir casi-laminar y donde, entonces, las características moleculares de la superficie y del contaminante determinan su transporte.

De las tres resistencias, la resistencia de superficie es la más difícil de estimar. La resistencia de superficie depende mucho de las propiedades químicas y fisicoquímicas de la superficie, así como de las propiedades químicas del contaminante. El caso del SO₂ es un buen ejemplo para mostrar esa dificultad. La resistencia de superficie en este caso depende de la humedad de la superficie y de su pH. Una vez removido por la superficie, el SO₂ cambia a su vez el pH de esa superficie y por lo tanto las propiedades de su resistencia. Es decir, existe en este caso una interacción entre la composición química de la atmósfera y de la superficie. Otro ejemplo de la complejidad del problema es la deposición en la superficie de una hoja de una planta. En este caso la resistencia está relacionada con la fisiología y la actividad biológica de la hoja. Es evidente que es imposible describir la complejidad de una planta o incluso de una hoja en su totalidad.

Finalmente, para calcular los flujos de un contaminante desde la atmósfera hacia la superficie terrestre se estima la velocidad de deposición, que es justamente el valor inverso de la suma de las tres resistencias mencionadas.

10. MODELOS

La modelación de calidad del aire es una representación matemática de los procesos atmosféricos (físicos y químicos). Dado que es imposible describir el estado de la atmósfera a su nivel molecular, esta representación matemática esencialmente describe dichos procesos de una manera simplificada. El hecho de que existe una gran variedad de modelos es justamente un reflejo del grado de simplificación que la aproximación matemática de cada uno de ellos tiene. No está dentro del alcance de este documento abordar todos los tipos de modelos y menos todos sus detalles. Lo que sí se considera importante es entregar una breve descripción conceptual de los tipos de modelos más importantes: los modelos Gaussianos, Eulerianos, Lagrangeanos y de tipo *puff*.

10.1 Modelos Gaussianos

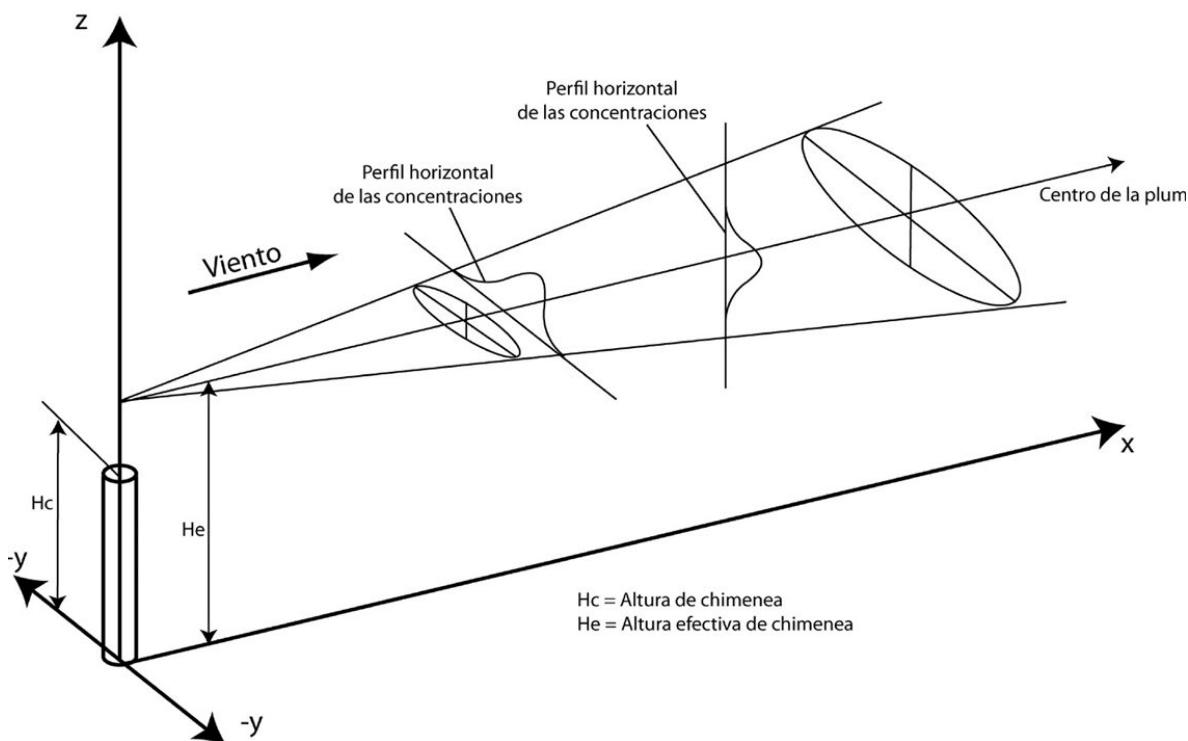
La Figura 28 representa la esencia de un modelo Gaussiano: se supone una fuente (en este caso puntual) que emite continuamente y que está ubicada en un ambiente con un viento u que sopla en forma paralela al eje x. Bajo estos supuestos, la aproximación de los modelos Gaussianos asume ahora que la pluma que tiene origen en la fuente emisora se desplaza paralelo a la dirección del viento y que dentro de la pluma la distribución de los contaminantes tiene una forma Gaussiana. Lo que determina la amplitud y el ancho de esa distribución son la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica. Mientras que la velocidad del viento se puede medir directamente, no existen tales mediciones para la estabilidad atmosférica, por lo que su estimación se basa fundamentalmente en algunas relaciones empíricas usando observaciones de temperatura, viento y cobertura nubosa.

Los modelos Gaussianos que están disponibles hoy en día exhiben distintos grados de complejidad; por ejemplo, pueden incluir procesos como deposición y sedimentación o también efectos de topografía. Sin embargo, en términos generales todos tienen el mismo fundamento matemático. Además, todos tienen las mismas suposiciones y aproximaciones, entre las cuales las más importantes en términos prácticos son:

- Las emisiones son constantes en el periodo de la evaluación. El cálculo de los modelos Gaussianos asume un estado estacionario cuyo tiempo característico depende de la escala espacial del problema y la magnitud del viento, pero que típicamente es del orden de entre una y dos horas.
- Las condiciones meteorológicas son constantes durante el periodo de la evaluación.
- Vientos homogéneos en la horizontal, es decir, que el viento en la fuente sea representativo para todo el dominio de evaluación. Es evidente que esta suposición hace muy limitado el uso de estos modelos en terreno complejo con un campo de viento muy heterogéneo.

La gran ventaja de los modelos Gaussianos es su uso fácil y rápido y que no requiere muchos recursos computacionales. Sin embargo, son justamente las suposiciones de esos modelos las que hacen su uso muy limitado.

Figura 28. Concepto de un modelo Gaussiano. Se supone que los gases salen con un cierto empuje de la chimenea (debido a su velocidad y la temperatura); en consecuencia, los modelos Gaussianos calculan la dispersión a partir de una altura efectiva, H_e , de la chimenea que justamente toma en cuenta este empuje. H_e siempre es mayor que la altura real de la chimenea, H_c . El eje de la dispersión siempre es paralelo a la dirección del viento.



Fuente: elaboración propia

10.2 Modelos Eulerianos

Mientras que los modelos Gaussianos representan la aproximación más simple a la dispersión de contaminantes, los modelos Eulerianos son los que apuntan a tratar los procesos atmosféricos en toda su complejidad. Dentro de esos procesos atmosféricos hay que distinguir entre los procesos físicos y los procesos químicos y de dispersión. Los procesos físicos representan la parte meteorológica de la atmósfera y los procesos químicos y de dispersión son los que describen la transformación química y el transporte de los contaminantes. La mayor parte de esos procesos se conoce muy bien y se pueden describir a través de ecuaciones matemáticas. Así que, la primera característica de un modelo Euleriano es la representación de los procesos

físicos y químicos a través de ecuaciones matemáticas. Muchas de esas ecuaciones son ecuaciones diferenciales que dependen de las tres dimensiones del espacio y del tiempo. Sin embargo, no existen soluciones analíticas del conjunto de esas ecuaciones y, por lo tanto, no se puede tratar la atmósfera como un espacio continuo sino como un espacio discreto. Es decir, el volumen de la atmósfera se representa a través de una grilla (o malla) que consiste en puntos discretos. Ocupando ahora algoritmos numéricos sí se pueden resolver todas las ecuaciones en cada uno de esos puntos y, de esta manera, describir la evolución espacial de la atmósfera en sus tres dimensiones. En consecuencia, los modelos Eulerianos producen información temporal en cada punto de la grilla de cada variable atmosférica. Esas variables pueden ser de tipo meteorológico (por ejemplo, viento, temperatura, presión, temperatura, etc.) o de tipo químico (concentraciones).

Tradicionalmente, se trataba la parte meteorológica en un modelo y, en un paso posterior, la parte química y de dispersión en otro modelo. Esta aproximación que usa dos modelos también se llama aproximación *off-line*. En este caso, un modelo meteorológico produce los campos meteorológicos que se guardan en un cierto intervalo de tiempo (típicamente cada media o cada hora). Estos campos meteorológicos se usan en los modelos de dispersión para el cálculo del transporte (por viento y turbulencia) y en algunos procesos químicos. Al contrario de la aproximación *off-line*, la aproximación on-line trata todos los procesos atmosféricos en un solo modelo. Es decir, la integración de las ecuaciones que describen la meteorología y aquellas que describen la dispersión y los procesos químicos se realiza al mismo tiempo en el mismo modelo.

Ambas aproximaciones tienen ventajas y desventajas. La gran ventaja de los modelos on-line es que el tratamiento de procesos de transporte (parametrizaciones y algoritmos numéricos) de los escalares químicos (concentraciones de contaminantes) y meteorológicos (por ejemplo, la humedad) es idéntico, o sea, todo el modelo en sí es consistente. Además, resolver la dispersión al mismo tiempo con la meteorología también significa que se toma en cuenta toda la variabilidad temporal de los vientos y la turbulencia para el transporte de contaminantes. Al contrario, la aproximación *off-line* no considera más variabilidad que los intervalos en que los datos meteorológicos se han guardado (es decir, típicamente del orden de media o una hora). Además, normalmente, los tratamientos de los procesos de transporte, tanto en términos de parametrización y de algoritmos numéricos, son distintos entre un modelo meteorológico y un modelo químico y de dispersión, lo que representa una inconsistencia entre uno y otro modelo. En este sentido, se puede esperar resultados más realistas en la aproximación on-line que en *off-line*. Sin embargo, la gran ventaja de la aproximación *off-line* es su flexibilidad. Mientras en la aproximación on-line siempre se tiene que calcular tanto la parte meteorológica como la química y de dispersión, en la aproximación *off-line* la parte meteorológica se calcula una sola vez y se guarda en una base de datos. Ocupando esa base de datos, se puede calcular el modelo químico y de dispersión las veces que sea necesario (por ejemplo, para evaluar muchos tipos de escenarios de emisiones).

10.3 Modelos Lagrangeanos

El concepto de un modelo Lagrangeano es que matemáticamente se sigue el movimiento de una parcela de aire o de una partícula en la atmósfera. Es decir, si en una posición inicial de una partícula se conoce el viento, fácilmente se puede calcular a dónde va esa partícula en un intervalo de tiempo finito (integración en el tiempo). Después de esa integración la partícula tiene una posición nueva en el espacio donde el viento (tanto en su magnitud como en dirección) puede ser distinto que en la posición inicial. Ocupando esa información del viento, nuevamente, se puede integrar en el tiempo moviendo la partícula a otra posición y así sucesivamente se sigue en la integración. El camino que se describe a través de esa integración se llama trayectoria. Aparte de los procesos de transporte por viento, también se pueden incorporar los procesos turbulentos de la atmósfera y, de esta manera, los modelos Langrangeanos, igual que los modelos Eulerianos, se basan en la simulación de procesos.

Si bien el cálculo de una trayectoria puede entregar información valiosa sobre el destino de la contaminación de una fuente, no permite la estimación de concentraciones. Para este fin, se requiere el cálculo de muchas trayectorias (del orden de un millón por fuente).

El requerimiento principal para el uso de los modelos Lagrangeanos es la disponibilidad de datos meteorológicos cuadri-dimensionales (tres dimensiones en el espacio más el tiempo). Esa información debería venir de un modelo meteorológico numérico de tipo Euleriano. En segundo lugar, para estimar concentraciones este tipo de modelo requiere muchos recursos computacionales lo que ha limitado su uso en el pasado.

10.4 Modelos Tipo *Puff*

Los modelos tipo *puff* son una combinación entre los modelos Gaussianos y los modelos Lagrangeanos. Lo que hacen estos modelos es esencialmente calcular la dispersión de una emisión puntual (puntual en el tiempo), llamado *puff*, a lo largo de una trayectoria. Su aproximación matemática es estimar la dispersión en forma Gaussiana en cada punto de una trayectoria. Es decir, a diferencia de los modelos Langrangeanos que necesitan el cálculo de un gran número de trayectorias para una fuente, en el caso de los modelos tipo *puff* sólo se requiere una trayectoria por *puff* lo que hace su cálculo mucho más rápido. En el caso de emisiones continuas, se simulan trayectorias y la dispersión Gaussiana de muchos *puff*. Además, son capaces de simular muchas fuentes y fuentes de distinto tipo al mismo tiempo. Generalmente, los modelos de tipo *puff* son muy rápidos en su uso sin mayor exigencia computacional. Sin embargo, sus limitaciones se basan en que no simulan procesos, sino que la dispersión depende fuertemente de los principios de la aproximación Gaussiana.



ANEXO II. APPLICACIÓN DE MODELOS FOTOQUÍMICOS

A continuación se describen las diferencias fundamentales entre la aplicación de modelos fotoquímicos para estimar contaminantes secundarios y la aplicación de modelos para contaminantes primarios.

a) Inventario de emisiones

En el caso de los contaminantes secundarios es necesario poner las emisiones del proyecto a evaluar en el contexto de todas las otras emisiones existentes. Estas emisiones se encuentran usualmente en los inventarios de emisiones oficiales. Dado que no existen inventarios completos para todo el país que cumplan con los requerimientos de los modelos, se pueden usar las emisiones declaradas mediante el D.S. N°138 del Ministerio de Salud para fuentes industriales, disponible en: www.retc.cl.

Para fuentes urbanas (móviles y de área) se debe usar un perfil de la atmósfera. Sin embargo, la información sobre la especiación química de las emisiones en Chile es limitada, por lo que no existen fundamentos sólidos para elaborar tal perfil. Debido a lo anterior, se recomienda usar un perfil estándar. Dado que no existe una base científica para este estándar, se puede usar un perfil distinto en caso de que se tenga un sustento técnico. El perfil estándar recomendado es el siguiente:

Tabla 5. Perfil estándar de compuestos o sustancias

| ESPECIE | MOL °C/(KM ² .HR) |
|--|------------------------------|
| COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES | |
| Alcanos | 300 |
| Eteno | 20 |
| Alquenos | 80 |
| Aromáticos | 150 |
| Formaldehído | 70 |
| Otros aldehídos | 30 |
| SUSTANCIAS INORGÁNICAS | |
| Óxidos de nitrógeno (90% NO, 10% NO ₂) | 45 |
| Monóxido de carbono | 600 |

Fuente: elaboración propia

b) Condición de borde

Los modelos fotoquímicos generalmente pueden ser usados con una condición de borde química por defecto. Sin embargo, esta condición por defecto no necesariamente refleja bien las condiciones de borde en Chile. En consecuencia, se recomienda usar los perfiles estándares basados en las condiciones promedio del modelo MATCH del Instituto Max-Planck de Alemania (representativos para el año 2010). En caso que el titular disponga de otra base de datos científica, también puede hacer uso de ella junto con una justificación y su descripción. Los perfiles estándares son:

Tabla 6. Perfil estándar de compuestos o sustancias

| SUSTANCIA | CAPA LÍMITE (PPB) | TROPÓSFERA LIBRE (PPB) |
|-----------------------|-------------------|------------------------|
| Ozono | 20,00 | 40,00 |
| Monóxido de carbono | 60,00 | 60,00 |
| Monóxido de nitrógeno | 0,01 | 0,01 |
| Dióxido de nitrógeno | 0,02 | 0,02 |
| Ácido nítrico | 0,04 | 0,09 |
| Etano | 0,25 | 0,25 |
| Propano | 0,03 | 0,01 |
| Formaldehído | 0,30 | 0,30 |
| Aldehído etílico | 0,03 | 0,01 |
| Acetona | 0,07 | 0,07 |
| Peroxiacetilnitrato | 0,01 | 0,07 |

Fuente: elaboración propia

Se pueden usar otros perfiles en caso de que se disponga de información, pero deben ser justificados técnicamente

c) Simulación base y de proyecto

Debido a las incertidumbres de los inventarios de emisiones, los valores absolutos de las concentraciones que entregan los modelos tampoco tienen la confiabilidad necesaria para ser usadas directamente en la evaluación. En consecuencia, se deben realizar dos simulaciones, una sin y una con proyecto. De esta manera, el resultado de la modelación no será las concentraciones absolutas sino la diferencia entre ambas simulaciones. Esta diferencia se asocia al impacto del proyecto y se debe sumar a la calidad del aire medida.

d) Período de simulación

Debido a lo intensivas⁸⁴ que son las simulaciones en términos computacionales y a que, además, se deben realizar dos simulaciones paralelas, se puede simular un mes por estación (enero, abril, julio, octubre). Con el fin de calcular concentraciones anuales, se debe tomar cada mes como representativo para su respectiva estación del año.

⁸⁴ Uso intensivo de capacidad de procesamiento de los computadores, lo que se ve reflejado en los tiempos de modelación, desde días a semanas.



ANEXO III. ARCHIVOS DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS MODELOS

La presentación de estos archivos durante el proceso de evaluación debe estar en concordancia con lo indicado en el Instructivo que deja sin efecto OF. ORD. del ANT.1) y 2), e imparte instrucciones sobre foliación y registro de expedientes SEIA, con Of. Ord. D.E. N°202099102718, del 14 de diciembre de 2020, o el instructivo que lo reemplace y se encuentre vigente.

| | | |
|----------------|--------------------------|--|
| WRF | WRF | NAMELIST.INPUT NAMELIST.WPS |
| | POST-PROCESO | [NOMBRE].DAT [NOMBRE].MET |
| AERMOD | AERMET | [NOMBRE].SAM [NOMBRE].INX(*) [NOMBRE].RPX [NOMBRE].MGX [NOMBRE].SFC [NOMBRE].PLF [NOMBRE].UP(**) |
| | AERMOD | [NOMBRE].ADI [NOMBRE].ADO [NOMBRE].AST [NOMBRE].ISC [NOMBRE].ROU [NOMBRE].SOU |
| | POST-PROCESO | [NOMBRE].POS |
| CALPUFF | CALMET | GEO.DAT SURF.DAT UP.DAT CALMET.DAT CALMET.INP |
| | CALPUFF | CALPUFF-DAT CALPUFLST CALPUFF.INP CONC.DAT |
| | CALPOST | CALPOST.DAT CALPOST.LST CALPOST.INP |
| | POST-PROCESO | [NOMBRE].CPV |
| | ARCHIVOS COMPLEMENTARIOS | "Coastline Data File" "Dry Flux Data File" "Wet Flux Data File" "Ozone Data File" "Chem Data File" Entre otros |

Fuente: Elaboración propia

(*): IN1, IN2 y IN3.

(**): Solo en caso de que se considere meteorología de altura de fuente externa.



ANEXO IV. SOLICITUD DE INFORMACIÓN PARA ESTIMACIÓN DE TASAS DE EMISIÓN EN CONSIDERACIÓN A BALANCES DE MATERIA O MASA

Para proyectos que estimen sus tasas de emisión de contaminantes atmosféricos a través de balances de materia o masa se deben incluir los detalles de las actividades que se llevan a cabo y cómo estos detalles pueden afectar la liberación de emisiones y su dispersión en la atmósfera. La Tabla 7 presenta una lista de información mínima del proceso que debe incluirse en la descripción del proyecto y en el informe de estimación de emisiones o su correspondiente. Cabe indicar que, esta información no es excluyente a otros tipos de obtención de las tasas de emisión en caso de ser pertinente.

Tabla 7. Información mínima para la obtención de tasas de emisión a través de balances de materia o masa.

| ELEMENTOS MÍNIMOS | DESCRIPCIÓN |
|---|--|
| Diagrama de flujo del proceso | Esto debe mostrar claramente todas las operaciones unitarias que se llevarán a cabo. |
| Datos de producción | Detalles de los procesos por lotes o continuos que se presentarán para incluir la duración de la operación para cada ciclo distinto |
| Tasa de producción | Debe indicarse la tasa de material procesado (toneladas/hora), la tasa de artículos procesados por hora para los procesos generales de fabricación u otros indicadores de la actividad del proceso. |
| Información operativa | Deben indicarse las horas de funcionamiento y la consideración de cualquier variación estacional en la actividad. |
| Entradas y salidas | Se debe incluir listas detalladas de todas las entradas y salidas del proceso. |
| Equipos que pueden ser una fuente de emisión | Se debe incluir equipos emisores, especialmente fuentes de área y estacionarias. |
| Tamaños y capacidades | Incluir la cantidad de producción producida por unidad de tiempo. |
| Procesos unitarios | Presentar una descripción de los procesos y actividades de la unidad individual, la que también debe incluir información relevante que describa la actividad: <ul style="list-style-type: none"> • Posible variabilidad operativa; • Tipo de material; • Métodos de entrega, almacenamiento y manejo de materiales; • Horas de funcionamiento y capacidad en relación con las cantidades de material; • Mantenimiento preventivo y minimización del tiempo de inactividad; • Sincronización de las operaciones para maximizar la dispersión y minimizar las emisiones; |
| Tratamiento y abatimiento de emisiones | Si se propone o requiere, el informe debe incluir detalles de los sistemas de tratamiento y reducción de emisiones e información operativa esencial para estos sistemas, con una descripción de todos los aspectos del sistema de control de emisiones al aire, con especial atención a cualquier captura de emisiones fugitivas (por ejemplo, campanas, conductos), tratamiento (por ejemplo, depuradores, filtros de mangas) y sistemas de descarga (por ejemplo, chimeneas). Específicamente, se debe incluir cualquier garantía u otra información sobre el desempeño de los sistemas. |

Fuente: Elaboración propia



ANEXO V. BIBLIOGRAFÍA

Alberta Environment and Sustainable Resource Development, 2013. Air Quality Model Guideline.

Atmospheric Studies Group, 2011. Generic Guidance and Optimum Model Settings for the CALPUFF Modeling System for Inclusion into the Approved Methods for the Modeling and Assessments of Air Pollutants in NSW, Australia, pp.18.

Falvey, M., Ibarra, M., Jacques, M., Muñoz, R., Schmitz, R., Garreaud, R. y Molina, A., 2010. Ámbitos de Investigación Necesarios para el Desarrollo Eólico en Chile Relacionados con el Comportamiento del Recurso Viento, Informe Final, Comisión Nacional de Energía.

Falvey, M., Schmitz, R., Ibarra, M., Ozimića, N. y Oporto, L., 2009. Modelación de Alta Resolución para Fines de Prospección de Energías Renovables no Convencionales en el Norte de Chile, Informe Final, Comisión Nacional de Energía.

Federal Register, Rules and Regulations. Vol. 82, N° 10, 17 de enero de 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 Matter.

Hyndman, R. J., & Koehler, A.B., 2006. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting, 22(4), 679–688. Doi: 10.1016/j.ijforecast.2006.03.

Jorquera, H., Castro, J., Cifuentes, L., Daroch, P., Hinojosa, O., Palacios, R., Pfeng, C. y Pino, E., 2010. Actualización Metodológica MODEM-MODEC para el Gran Santiago, Informe final, SECTRA.

Schmitz, R., 2011. Evaluación de Impacto de Escenarios por Uso de Biocombustibles en Ozono en la Región Metropolitana, Informe Final, Ministerio de Energía.

Schmitz, R., Muñoz, R. y Falvey, M., 2011. Informe Técnico Uso de Modelos de Calidad del Aire en la Evaluación Ambiental de Proyectos - Elaboración de un Documento Guía para el Uso de Modelos de Calidad del Aire en el SEIA. Licitación pública ID 1588-170-LE10, contrato aprobado mediante Resolución Exenta N°122, de 21 de marzo de 2011, de la Dirección Ejecutiva del SEA, Untec.

Schmitz, R., Falvey, M., Clerc, J., Ozimića, N. y Oporto, L., 2010. Optimización del Modelo Fotoquímico de Alta Resolución Implementado en la Fase 2007 y Ampliación de su Alcance a Material Particulado Respirable y Precursores, Informe Final, CONAMA Nacional.

Schmitz, R., Falvey, M. y Jacques, M., 2007a. Implementación de un Modelo Fotoquímico para la Macrozona Central del País, Informe Final, CONAMA Nacional.

Schmitz, R. y Falvey, M., 2007b. Diseño de Plan Operacional de Seguimiento de la Calidad del Aire para Ozono Troposférico en la Región Metropolitana, CONAMA RM.

Spangl. W. et al, European Commission, Brussels, 2007. Reporte Final Representativeness and classification of air quality monitoring station, pp. 53–62.

U.S. EPA, 2009a. Reassessment of the Interagency Workgroup on Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report: www.epa.gov

U.S. EPA, 2009b. Clarification on EPA-FLM Recommended Setting for CALMET, Memorandum: www.epa.gov

U.S. EPA, 2021. AERMOD Implementation Guide, pp. 3-15.

