



0007
KAS
Ambiental

KAS
Ambiental

**ANTECEDENTES PARA LA REVISIÓN DE LAS
NORMAS PRIMARIAS DE CALIDAD DE AIRE PARA
DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂),
MONÓXIDO DE CARBONO (CO),
OZONO (O₃),
DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂)**

LICITACIÓN N° 1588-72-LE-09

INFORME FINAL

**PREPARADO PARA
COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE**



GOBIERNO DE CHILE
COMISIÓN NACIONAL
DEL MEDIO AMBIENTE

DICIEMBRE 2009

1 RESUMEN EJECUTIVO

Las normas primarias de calidad de aire son instrumentos que permiten prevenir la exposición de la población a contaminantes presentes en la atmósfera. Establecen los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos, o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o salud de la población, y definen los niveles que originan situaciones de emergencia¹

Es así como el 17 de Diciembre de 1999, se da inicio al proceso de revisión de normas primarias de calidad del aire para Anhídrido Sulfuroso (SO₂), Partículas Totales en Suspensión (PTS), Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O₃) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂), dando como resultado las actuales normas primarias de calidad de aire para Anhídrido Sulfuroso, Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Monóxido de Carbono contenidos en cuatro decretos supremos D.S. N° 112 (D.O. 06.03.2003), D.S. N° 113 (D.O. 06.03.2003), D.S. N° 114 (D.O. 06.03.2003), D.S. N° 115 (D.O. 10.09.2002).

En el tiempo transcurrido desde la dictación de las normas primarias de calidad del aire hasta el presente se han registrado avances en el conocimiento sobre la contaminación atmosférica y sus impactos en la salud humana. También, existen nuevas actualizaciones de las regulaciones a nivel internacional que es necesario considerar.

Transcurridos más de cinco años desde la última actualización se hace necesario revisar las normas primarias de calidad de aire como establece el reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión D.S. N°93.

El objeto de este estudio fue revisar las normas de calidad primaria contenidas en los decretos supremos: D.S. N° 112, D.S. N° 113, D. S. N° 114 y D.S. N° 115; de manera de evaluar su implementación e identificar los posibles cambios que sean necesarios de realizar para mejorar la eficacia y eficiencia de su aplicación.

Además el estudio permitió:

- Contar con un análisis de los resultados de las investigaciones científicas nacionales e internacionales que aporten antecedentes nuevos sobre efectos adversos de los contaminantes a las personas o sobre nuevas metodologías de medición.
- Contar con un análisis sobre la normativa internacional de manera de comparar y aprovechar las experiencias existentes en la actualización de

¹ Artículo 2° Decreto Supremo N°93 de 1995." Reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión".

las normativas (metodología de medición, criterios de excedencia, entre otros).

- Revisar los antecedentes considerados para la determinación de la norma y de los cambios en las condiciones ambientales desde el momento de dictación de las normas antiguas.
- Contar con una propuesta fundamentada de actualización de las normas de calidad primaria en base al análisis en los objetivos anteriores.

1.1 Avances científicos sobre los efectos crónicos y agudos de los contaminantes sobre la salud

En esta revisión de antecedentes científicos se recurrió a la revisión sistemática de dos fuentes principales de información, las Guías de Calidad de Aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y los documentos asociados a los estándares de calidad de aire de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

El propósito principal de las guías de calidad del aire de la OMS, cuya última revisión se llevó a cabo en el año 2005², es entregar las bases para proteger la salud pública de los efectos de la contaminación del aire, y lograr la eliminación o reducción a niveles mínimos de los contaminantes que son conocidos o probablemente dañinos para la salud de las personas.

De esta forma, las guías de calidad de aire de la OMS (GCA) proveen antecedentes sobre contaminantes y entregan recomendaciones para las naciones al momento de elaborar estándares de calidad del aire. En ellas prevalece la información sobre niveles de exposición y características del medio ambiente, sociales, económicas y culturales relacionadas con cada nación o región estudiada.

Por su parte, los estándares de calidad del aire de la EPA, están asociados a la declaración del Acta del Aire Limpio (Clean Air Act)³ emanada del Congreso de los Estados Unidos. En esta acta se mandataba la creación de Estándares Nacionales de Calidad de Aire (National Ambient Air Quality Standards – NAAQS) para los contaminantes criterios. Estos contaminantes “criterio” a grandes rasgos se definen como aquellos contaminantes que se encuentran ampliamente distribuidos por el territorio de los Estados Unidos y que suponen un riesgo importante a la

² WHO (2005). Air Quality Guidelines- Global Update (Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe).

³ EPA (1999). The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010. November 1999.

salud de la población. Actualmente, tanto el SO₂, NO₂, O₃ como el CO son contaminantes criterio.

A continuación, se presentan los principales antecedentes referidos a los límites establecidos para los contaminantes en estudio (SO₂, NO₂, O₃ y CO), establecidos tanto por la OMS y por la EPA.

1.1.1 Dióxido de Azufre (SO₂)

La OMS, ha propuesto guías de calidad de aire para SO₂ de 24 horas y 10 minutos basados largamente en estudios clínicos con sujetos asmáticos realizando ejercicio físico y en estudios de series de tiempo y morbilidad respiratoria. Gran relevancia tienen los estudios de intervención en Hong Kong⁴. Los valores propuestos son de 188 ppb [500 µg/m³] para un período de 10 minutos y de 7,5 ppb [20 µg/m³] para un período de 24 horas. El valor de largo plazo, expresado como promedio anual, ha sido retirado recientemente⁵.

La EPA, basándose en los estudios clínicos con asmáticos⁶, está estudiando un nuevo estándar de 1 hora con concentraciones de entre 50 ppb [125 µg/m³] y 150 ppb [393 µg/m³]. A su vez se considera revisar y eventualmente dependiendo del nivel de 1 hora eliminar los estándares de 24 horas y anual. Cabe destacar que los estándares actuales de la EPA datan de 1971⁷.

En Chile, la norma vigente es de 96 ppb [250 µg/m³] como promedio de 24 horas y de 31 ppb [80 µg/m³] como media anual⁸. No existe una norma de corto plazo, ya sea de 1 hora ó 10 minutos, que permita proteger la salud de la población.

1.1.2 Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

La guía actual de la OMS para NO₂ incluye valores para la exposición de corto y largo plazo. Primeramente, existe un valor guía de corto plazo para el promedio de 1 hora de 110 ppb [200 µg/m³]. El estándar de largo plazo es anual y corresponde a un promedio de concentraciones de 21 ppb [40 µg/m³].

⁴ Wong, C.M., Ma, S., Hedley, A.J., and Lam, T.H. (2001). Effect of air pollution on daily mortality in Hong Kong. *Environ Health Perspect* 109, 335-340.

⁵ WHO (2005). Air Quality Guidelines- Global Update (Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe).

⁶ Linn, W.S., Venet, T.G., Shamoo, D.A., Valencia, L.M., Anzar, U.T., Spier, C.E., and Hackney, J.D. (1983). Respiratory effects of sulfur dioxide in heavily exercising asthmatics. A dose-response study. *The American review of respiratory disease* 127, 278-283.

⁷ EPA (2009b). Risk and Exposure Assessment for the SO₂ NAAQS.

⁸ Norma primaria de calidad del aire para Dióxido de Azufre (SO₂) D.S. N° 113 de 2002 Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

El valor de 1 hora de la guía fue primeramente propuesto en las guías del año 2000 con un valor idéntico al actual. Este valor fue mantenido en las guías del año 2005⁹. Asimismo, la guía anual fue introducida el año 2000 y mantenida el 2005 con el mismo valor.

La actual norma de la EPA para el NO₂ es de 53 ppb [100 µg/m³] como promedio anual, cuyo valor data de 1971¹⁰. Se han hecho revisiones de los documentos criterio para NO₂ en 1982 y 1993. Pese a la incorporación de nueva evidencia, no se encontró necesario modificar el estándar de anual de NO₂ o introducir nuevos estándares.

Actualmente, los estándares se encuentran en proceso de revisión, cuyos resultados se esperan para Enero de 2010, donde se sugerirá la incorporación de un nuevo estándar de corto plazo de un promedio de exposición de 1 hora con una concentración entre 80 y 100 ppb [150 y 188 µg·m³], con un rango inferior de 65 ppb [122 µg·m³] y un rango máximo de 150 ppb [282 µg/m³].

La EPA sugiere además, que las redes de monitoreo también se emplacen en sitios con un alto impacto de tráfico de modo de medir los niveles de la población más expuesta a las emisiones del tráfico vehicular.

En Chile la norma vigente es de 213 ppb [400 µg/m³] como promedio de 1 hora y de 53 ppb [100 µg/m³] como media anual¹¹, ambos más del doble de los valores guías recomendado por la OMS.

1.1.3 Ozono (O₃)

La primera guía para O₃ apareció en las guías de 1987. Era una guía para concentración de 1 hora y consideraba un rango entre 75-100 ppb [150 a 200 µg/m³]. Luego, en la revisión del 2000 el valor de 1 hora fue reemplazado por el de 8 horas cuya concentración correspondía a 60 ppb [120 µg/m³]. Finalmente la guía para una concentración de 8 horas fue reemplazada en la revisión del 2005, donde se ha planteado en períodos de 8 horas un valor de 50 ppb [100 µg/m³] basado principalmente en estudios de series de tiempo que analizan la mortalidad y estudios clínicos de exposición en cámaras¹².

⁹ WHO (2005). Air Quality Guidelines- Global Update (Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe).

¹⁰ EPA (2009a). Risk and Exposure Assessment for the NO₂ NAAQS.

¹¹ Norma primaria de calidad del aire para Dióxido de Carbono (NO₂), D.S. N° 114 de 2002, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

¹² Horstman, D.H., Folinsbee, L.J., Ives, P.J., Abdul-Salaam, S., and McDonnell, W.F. (1990). Ozone concentration and pulmonary response relationships for 6.6-hour exposures with five hours of moderate exercise to 0.08, 0.10, and 0.12 ppm. *The American review of respiratory disease* 142, 1158-1163.

La norma de la EPA ha evolucionado desde una norma de 1 hora para una concentración de 120 ppb [$240 \mu\text{g}/\text{m}^3$] implementada el año 1986, a una de 8 horas que fue introducida el año 1996 con un valor de 80 ppb [$160 \mu\text{g}/\text{m}^3$]. El año 2008 se revisó la norma de 8 horas al valor actual de 75 ppb [$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$].

Recientemente aparecieron 2 estudios que han tenido un gran impacto, los estudios de Adams (Adams 2002¹³ y 2006¹⁴). Estos estudios de exposición en cámaras replican los resultados anteriores pero encuentran que algunos sujetos muestran reacciones de función pulmonar a concentraciones tan bajas como 60 ppb [$160 \mu\text{g}/\text{m}^3$]. Estas observaciones están en línea con un estándar del nivel de las guías de la OMS.

Sin embargo, le EPA en consideración a estos estudios rebajó su estándar a 75 ppb [$150 \mu\text{g}/\text{m}^3$] en consideración a estos estudios argumentando que este valor era suficiente para proteger la salud pública con un adecuado margen de seguridad. Además, se menciona que la Acta de Aire Limpio no indica la necesidad de obtener niveles de riesgo cero sino de niveles que reduzcan el riesgo lo suficiente para proteger la salud pública con un margen adecuado de seguridad.

En Chile la norma vigente es de 61 ppb [$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$] como promedio de 8 horas¹⁵.

1.1.4 Monóxido de Carbono (CO)

La guía actual de la OMS para CO es de 25 ppm [$27 \mu\text{g}/\text{m}^3$] para 1 hora y 10 ppm [$12 \mu\text{g}/\text{m}^3$] para 8 horas. Estos valores se han matenido desde la publicación por primera vez de las Guías de calidad del aire en el año 1987.

Las actuales normas de la EPA para el CO son de 35 ppm [$40 \text{mg}/\text{m}^3$] como promedio de 1 hora y de 9 ppm [$10 \mu\text{g}/\text{m}^3$] como promedio de 8 horas. Estos estándares no han sido modificados desde su creación en 1971.

Tanto la norma de la EPA como las guías de la OMS se basan en estudios de concentración de carboxihemoglobina en la sangre.

No existen estudios científicos recientes que indiquen un cambios las guías de la OMS o estándares propuestos por la EPA.

¹³ Adams, W.C. (2002). Comparison of chamber and face-mask 6.6-hour exposures to ozone on pulmonary function and symptoms responses. *Inhal Toxicol* 14, 745-764.

¹⁴ Adams, W.C. (2006). Comparison of chamber 6.6-h exposures to 0.04-0.08 PPM ozone via square-wave and triangular profiles on pulmonary responses. *Inhal Toxicol* 18, 127-136.

¹⁵ Norma primaria de calidad del aire para Ozono (O_3), D.S. N° 112 de 2002, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

Para el caso de Chile, la norma actual es de 26 ppm [28 mg/m³] para 1 hora y 9 ppm [10 mg/m³] para 8 horas¹⁶. Los estándares nacionales son similares a los propuestos internacionalmente.

1.2 Revisión de normativas nacionales e internacionales de calidad de aire relacionadas con los contaminantes en estudio SO₂, O₃, NO₂ y CO

Este capítulo presenta una comparación de la normativa nacional e internacional relativa a la calidad del aire, considerando valores máximos permisibles, las situaciones de prevención alerta y emergencia, las tecnologías y métodos de medición, y el seguimiento y control de las medidas que se implementan, analizando los contaminantes de estudio (SO₂, NO₂, O₃ y CO).

Los países u organizaciones consideradas en base a una representación heterogénea cultural y geográfica son: la Organización Mundial de la Salud, Estados Unidos, la Unión Europea, México, Argentina, Brasil, China, Japón, Sudáfrica y Australia.

1.2.1 Dióxido de Azufre (SO₂)

A continuación, en la Tabla 1.1 se presentan los valores límites de SO₂, además de los tiempos de exposición con excedencias permitidas para los países o agrupaciones de países (caso de la Unión Europea), considerados.

En general, la exposición de tiempo considerado para este contaminante es de 24 horas y de 1 año. Los valores de la norma anual están en concentraciones que fluctúan alrededor de los 30 ppb, como es el caso de Chile, excepto para China (zona residencial), Australia y Sudáfrica, que tienen concentraciones máximas más estrictas de 23, 20 y 19 ppb [60, 52 y 50 µg/m³] respectivamente. La Unión Europea y Japón no tienen esta norma y USA está proponiendo reemplazarlas por la de una hora.

Por otro lado, la norma de 24 horas presenta variadas concentraciones límites en los distintos países, desde 40 ppb [105 µg/m³] para Japón hasta 140 ppb [367 µg/m³] para Estados Unidos, así como para Argentina y Brasil. Chile tiene una concentración de 96 ppb [250 µg/m³], que se acerca más a la norma australiana, pero Australia solo permite 1 excedencia mientras que Chile 4 al año (implícitamente en la definición del percentil 99). Chile se asemeja más a la Unión Europea en cuanto a la cantidad de excedencia permitida, pero el valor límite

¹⁶ Norma primaria de calidad del aire para Monóxido de Carbono (CO), D.S. N° 115 de 2002, Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

normado en Europa es de 50 ppb [$125 \mu\text{g}/\text{m}^3$], aproximadamente la mitad del valor de Chile.

Tabla 1.1. Valores Límites de SO₂ para Normas Primarias de Calidad de Aire a Nivel Internacional

País	Valor límite SO ₂ (ppb)	Tiempo promedio	Excedencia o condiciones de superación
Estados Unidos	140 [$365 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	No más de una vez al año.
	30 [$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	Ninguna.
	50-150 [$125-393 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	Propuesto
Unión Europea	130 [$350 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	No más de 24 veces anuales Valor límite aplicable desde 01-01-2005.
	50 [$125 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	No más de 3 veces anuales Valor límite aplicable desde 01-01-2005.
Chile	96 [$250 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	Promedio de 3 años del percentil 99 de los máximos diarios observados en 1 año calendario.
	31 [$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos es mayor o igual a lo indicado.
Argentina	140 [$365 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	No más de una vez al año.
	31 [$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	-
Brasil	140 [$365 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	No más de una vez al año.
	31 [$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	-
México	130 [$350 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	No más de una vez al año.
	30 [$80 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	-
China (I, II, III)	60/200/300 [$150/500/700 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	Ninguna
	19/57/96 [$50/150/250 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	
	8/23/38 [$20/60/100 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	
Japón	100 [$261 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	Ninguna
	40 [$105 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	
Sudáfrica	191 [$500 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	10 min.	Ninguna
	48 [$125 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	
	19 [$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	
Australia	200 [$500 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	1 día al año
	80 [$210 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	1 día al año
	20 [$52 \mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 año	Ninguna

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.1, compara las normativas diarias internacionales, en relación al valor para SO₂ recomendado por la OMS (8 ppb [$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$] en su última actualización del año 2005).

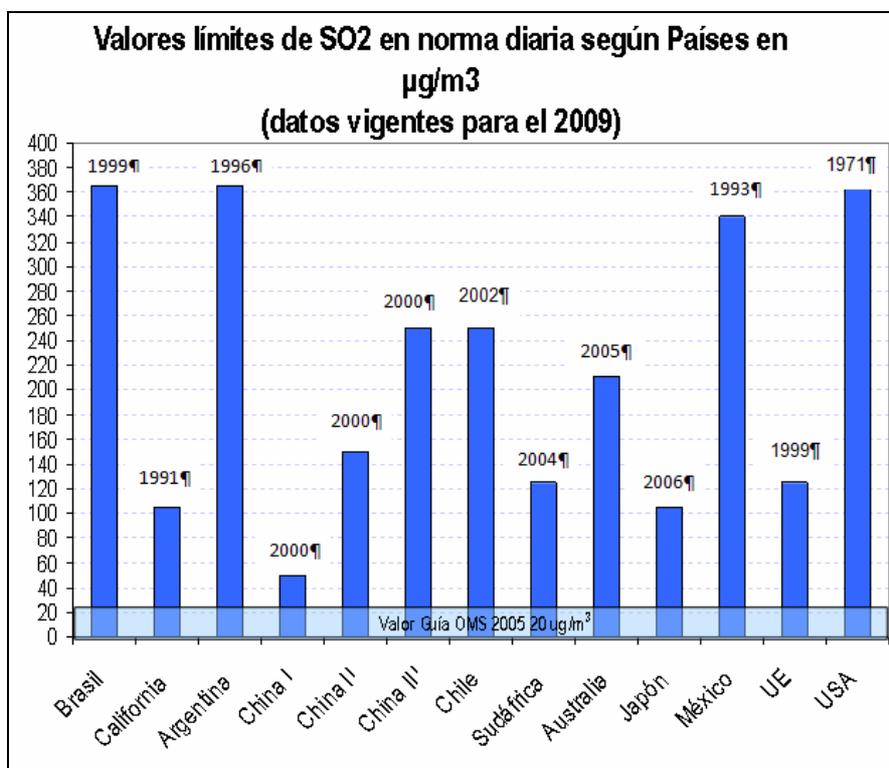


Figura 1.1. Comparación de las normas diarias de calidad de aire para Dióxido de Azufre.
Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 Dióxido de Nitrógeno

La Tabla 4.6, presenta los valores límites de NO₂ de los países estudiados, además de tiempos de exposición con excedencias permitidas. Uno de los países que luego de 38 años revisó la norma de NO₂ para incorporar un nuevo estándar horario es Estados Unidos. La norma horaria propuesta sugiere concentraciones máximas entre 65 y 150 ppb [122 µg/m³ – 282 µg/m³]. El 22 de enero del 2010 finalmente se fijó el nuevo estándar de 1 hora al nivel de 100 ppb [188 µg/m³] que define la concentración máxima permitida en cualquier parte de un área. Es decir, protege, según la EPA, contra los efectos asociados con una exposición de NO₂ de corto tiempo, incluyendo efectos respiratorios que pueden resultar en admisiones hospitalarias. En cuanto a las condiciones de superación, el nuevo estándar se rige por el promedio de 3 años del percentil 99 de una distribución anual de los máximos diarios de concentraciones promedios de 1 hora. Chile tiene una norma horaria desde el 2002, del doble de la Unión Europea y la OMS (213 ppb vs. 106 ppb).

Tabla 1.2. Valores Límites de NO₂ para normas primarias de Calidad de Aire para los países en estudio

País	Valor límite NO ₂ (ppb)	Tiempo promedio	Excedencia o condiciones de superación
Estados Unidos	65 - 150 [122 µg/m ³ – 282 µg/m ³] 100 [188 µg/m ³] (Final)	1 hora	No más de una vez al año
	53 [100 µg/m ³]	1 año	-
Unión Europea	106 [200 µg/m ³]	1 hora	No puede superarse más de 18 veces (=18 horas) por año. Valor límite aplicable el 01-01-2010
	21 [40 µg/m ³]	1 año	n/a Valor límite aplicable 01-01-2010 (1)
Chile	213 [400 µg/m ³]	1 hora	Promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos promedios registrados durante un año no pueden ser mayores o igual a lo indicado
	53 [100 µg/m ³]	1 año	Promedio aritmético de 3 años consecutivos es mayor o igual a lo indicado.
Argentina	200 [367 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
	53 [100 µg/m ³]	1 año	Ninguna.
Brasil	170 [320 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
	53 [100 µg/m ³]	1 año	Ninguna.
México	210 [395 µg/m ³]	1 hora	No más de una vez al año.
China (I, II, III)	60/60/130 [120/240/240 µg/m ³]	1 hora	Ninguna
	40/40/60 [80/120/120 µg/m ³]	24 horas	
	20/20/40 [40/80/80 µg/m ³]	1 año	
Japón	40 – 60 [80 µg/m ³ -113 µg/m ³]	24 horas	Ninguna
Sudáfrica	200 [376 µg/m ³]	1 hora	No se especifica
	100 [188 µg/m ³]	24 horas	No se especifica
	50 [94 µg/m ³]	1 año	No se especifica
Australia	120 [226 µg/m ³]	1 hora	No más de una vez al año.
	30 [56 µg/m ³]	1 año	Ninguna.

Fuente: Elaboración propia.

Las normas anuales que limitan las concentraciones de NO₂ se encuentran alrededor de 50 ppb, salvo para el caso de Australia y la Unión Europea. En la Figura 4.3, se observa que Chile posee el valor norma de concentraciones de NO₂ menos exigente entre los países considerados, seguido por México, Argentina y Brasil.

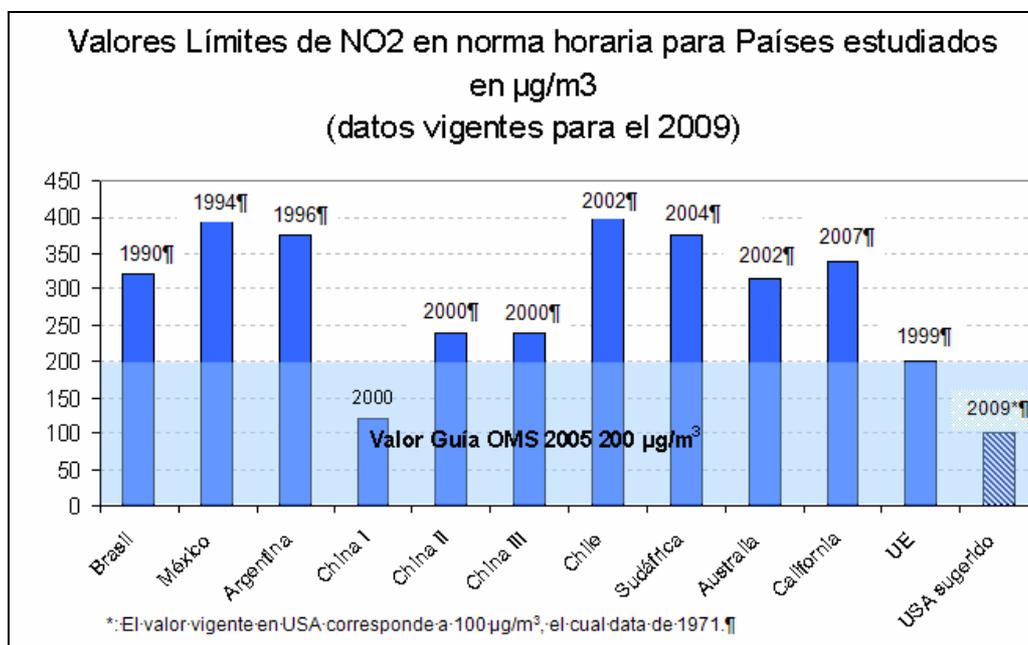


Figura 1.2. Valores límite de NO₂ norma horaria para países estudiados.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.3 Ozono

Con respecto al Ozono, en general los países analizados presentan tiempos de exposición normados de 1 y 8 horas. Las concentraciones reguladas en 1 hora son más comunes entre los países, y los niveles de concentración se limitan alrededor de 100 ppb [$196 \mu\text{g}/\text{m}^3$]. Nuevamente es Japón el país que tiene valores límites más exigentes, mientras Estados Unidos junto a Sudáfrica y Argentina son los países que tienen valores límites más altos para este contaminante, 120 ppb [$236 \mu\text{g}/\text{m}^3$]. Chile y la Unión Europea no tienen norma horaria.

Por otro lado, pocos países tienen norma de 8 horas para Ozono, entre los que cuentan Chile, Estados Unidos, Unión Europea y México. En Chile, el valor normado de concentración para O₃ en 8 horas es equivalente a los exigidos por la Unión Europea, pero se presentan condiciones de superación más exigentes en la Unión Europea. Sin embargo, el valor de concentración para este contaminante que rige en Chile aún corresponde al valor guía recomendado por la OMS en el año 2000.

La Tabla 4.4, presenta los valores límites de O₃, además de tiempos de exposición con excedencias permitidas para los países considerados. Uno de los países que está reconsiderando nuevamente la revisión de su valor límite para O₃ es Estados Unidos. En junio del 2012, está prevista la revisión de los valores límites de este

contaminante por la EPA con una decisión final de mantener o cambiar el valor en marzo del 2013.

Tabla 1.3. Valores Límites de O₃ para normas primarias de Calidad de Aire para los países en estudio

País	Valor límite O ₃ (ppb)	Tiempo promedio	Excedencia (o condiciones de superación)
Estados Unidos	120 [235 µg/m ³]	1 hora	Una vez al año
	75 [160 µg/m ³]	8 horas	El promedio de tres años consecutivos del cuarto valor más alto anual del máximo diario no debe superar el valor norma.
Unión Europea	61 [120 µg/m ³]	8 horas	No se puede sobrepasar más de 25 días por año, promediado en 3 años, a partir del 01-01-2010.
Chile	61 [120 µg/m ³]	8 horas	Promedio de 3 años del percentil 99 de los máximos diarios observados en 1 año calendario.
Argentina	120 [235 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
Brasil	80 ppb [160 µg/m ³]	1 hora	No más de una vez al año.
México	110 [216 µg/m ³]	1 hora	No se puede exceder más de 1 vez al año y se calcula considerando al menos 75% de los valores horarios diarios (18 horas). Si hay menos de 75% de los datos, la norma no se cumple si uno de los valores horarios es mayor a 110 ppb
	80 [157 µg/m ³]	8 horas	4 veces al año. La concentración del promedio de 8 horas debe ser menor o igual a 80 ppb, tomado como el 5to máximo dentro de un año.
China I, II y III	60/80/100 [120/160/200 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
Japón	60 [118 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
Sudáfrica	120 [235 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
Australia	100 [200 µg/m ³]	1 hora	Una vez al año.
	400 [200 µg/m ³]	4 horas	Una vez al año.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.2, se presenta una comparación de los límites de concentración de O₃ en 8 horas en países como Chile, Estados Unidos y México contrastados con el límite propuesto por los valores guía de calidad del aire de la OMS en el año 2000.

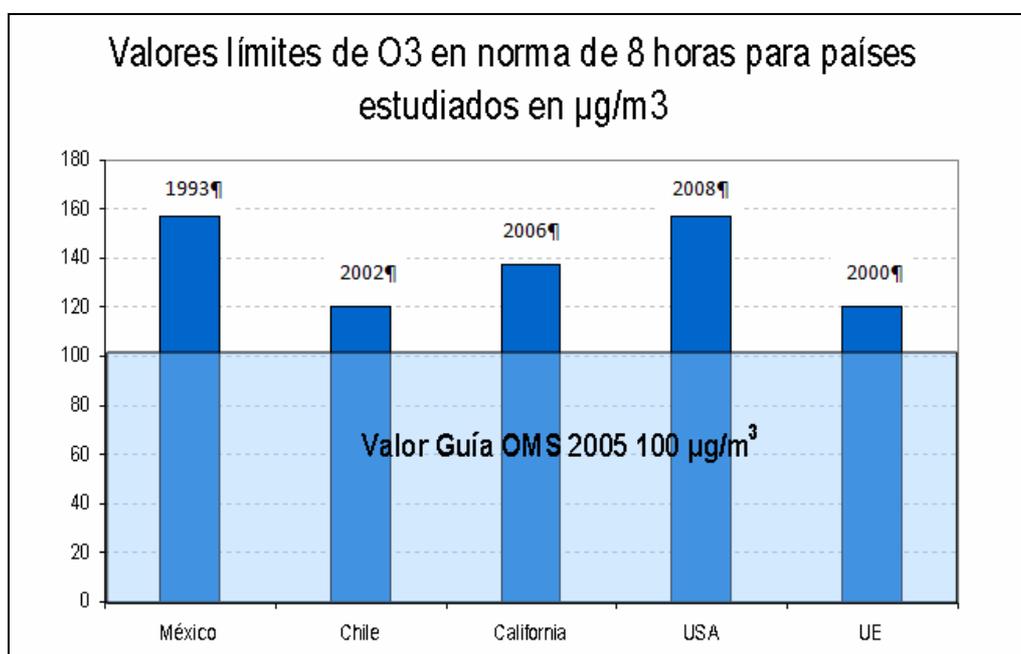


Figura 1.3. Comparación valores límite O₃ norma 8 horas para distintos países estudiados.
Fuente: elaboración propia.

1.2.4 Monóxido de Carbono

La Tabla 4.8, muestra los valores límites de CO para los países estudiados, además de tiempos de exposición con excedencias permitidas. Además en la Figura 1.4, se presenta la comparación de los valores norma para CO de 1 hora para distintos países comparado con el valor guía de la OMS publicado en el 2005. Estados Unidos tiene previsto comenzar el proceso de revisión de la norma en octubre del 2010 y decidir acerca de actualizar o mantener los valores en mayo del 2011.

Tabla 1.4. Valores Límites de CO para normas primarias de Calidad de Aire para los países en estudio

País	Valor límite CO (ppm)	Tiempo Promedio	Excedencia o condiciones de superación
Estados Unidos	35 [40.000 µg/m ³]	1 hora	No más de una vez al año.
	9 [10.000 µg/m ³]	8 horas	No más de una vez al año.
Unión Europea	9 [10.000 µg/m ³]	8 horas	Valor límite aplicable desde 01-01-2010
Chile	26 [30.000 µg/m ³]	1 hora	Promedio aritmético de 3 años consecutivos del percentil 99 de los máximos promedios de 1 hora registrados durante un año no puede ser mayor o igual a lo indicado
	9 [10.000 µg/m ³]	8 horas	
Argentina	35 [40.082 µg/m ³]	1 hora	Ninguna.
	9 [10.000 µg/m ³]	8 horas	Ninguna.

País	Valor límite CO (ppm)	Tiempo Promedio	Excedencia o condiciones de superación
Brasil	50 [57.250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	No más de una vez al año.
	10 [11.450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8 horas	No más de una vez al año.
México	11 [12.595 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8 horas	Ninguna
China I, II, III	9/9/18 [10.000/10.000/20.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	1 hora	Ninguna
	4/4/5 [4.000/4.000/6.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	
Japón	20 [22.800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8 horas	Ninguna
	10 [11.400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	24 horas	Ninguna
Sudáfrica	No hay Valores Norma	-	-
Australia	15 [17.670 $\mu\text{g}/\text{m}^3$]	8 horas	No más de una vez al año.

Fuente: Elaboración propia.

Japón, China y Chile presentan valores límites de CO mucho menos estrictos que los límites para CO de 25 ppm [27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$] para períodos de 1 hora y 10 ppm [12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$] para períodos de 8 horas recomendados por la OMS, y que de la mayoría de los países considerados en este estudio.

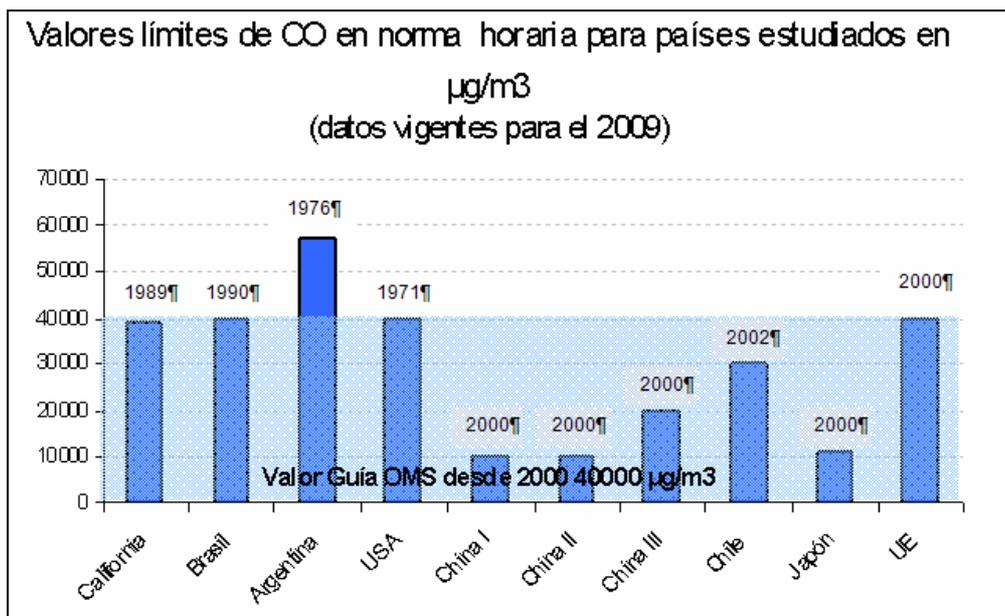


Figura 1.4. Comparación de valores de CO en norma horaria.

Fuente: elaboración propia.

1.2.5 Completitud de los datos en medición de contaminantes criterios

La completitud de los datos se refiere a la cantidad de datos que deben existir para considerar como válida la información de concentración de contaminantes en cada sitio de monitoreo y así poder evaluar con certeza la calidad de aire. Estos criterios se revisan por contaminante, tomando como referencia a Estados Unidos y la Unión Europea.

Cabe notar que, a nivel general, independientemente del período de exposición normado (1 hora, 24 hora, 1 año), la información es válida en tanto se dispongan con al menos el 75 por ciento de los datos.

1.2.6 Métodos de medición

La especificación de los métodos de medición en la formulación de estándares de calidad de aire es crucial para determinar y cumplir con las normas primarias de calidad de aire. Las muestras de gases que se toman para revisar el cumplimiento de la norma también sirven para la efectividad del control, así como también para determinar relaciones entre niveles de contaminación y salud ambiental.

En general, se nombran dos métodos de medición de calidad del aire, los de referencia y los de equivalencia. Los métodos de referencia, son aquellos utilizados como estándar, los cuales deben ser usados para determinar el cumplimiento de la norma.

Por otro lado, los métodos de equivalencia, que aplican principios de medición distintos a los de referencia han demostrado arrojar resultados semejantes y consistentes en relación al método de referencia. La equivalencia con los métodos de referencia la establece alguna institución autorizada basada en la aplicación de pruebas al principio de operación o funcionamiento del instrumento.

Los métodos que se presentan en la Tabla 1.5, son los métodos de referencia declarados en las normativas de los países considerados, los que en la mayoría de los casos se basan en los requisitos elaborados por la EPA., por lo que los métodos de medición de los contaminantes criterios usados por los países son semejantes.

Tabla 1.5. Métodos de medición para contaminantes en estudios utilizados a nivel internacional

País	Contaminante			
	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
Estados Unidos	Espectrofotometría (método de Pararosanilina)	Quimiluminiscencia fase gaseosa	Fotometría Ultravioleta	Fotometría infrarroja no dispersiva
California	Pararosanilina y Fluorescencia UV	Quimiluminiscencia fase gaseosa	Fotometría Ultravioleta	Fotometría infrarroja no dispersiva
Unión Europea	Fluorescencia ultravioleta	Quimiluminiscencia	Fotometría Ultravioleta	Espectroscopía infrarroja no dispersiva
México	Pararosanilina	Quimiluminiscencia en fase gaseosa	Quimiluminiscencia	Absorción infrarroja por medio de un fotómetro no dispersivo

País	Contaminante			
	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO
Brasil	Pararrosanilina	Quimiluminiscencia	Quimiluminiscencia	Espectroscopía infrarroja no dispersiva
China	Fluorescencia ultravioleta y método DOAA	Quimiluminiscencia y método DOAS	Fluorescencia Ultravioleta	N/A
Japón	Fluorescencia UV o conductimétrico	Método de Griess-Saltzman modificado o Quimiluminiscencia usando Ozono	Espectrofotometría con absorción de solución neutra de yoduro de potasio, espectrofotometría con absorción ultravioleta; o Quimiluminiscencia con Etileno	Método analítico infrarrojo no dispersivo
Australia	Analizador molecular fluorescencia UV	Quimiluminiscencia	Fotometría Ultravioleta	Fotometria infrarroja no dispersiva
Argentina	Técnicas de muestreo de EPA	Técnicas de muestreo EPA	Fotometría Ultravioleta	Fotometria infrarroja no dispersiva
Chile	Fluorescencia ultravioleta	Quimiluminiscencia en fase gaseosa Método de Griess-Saltzman modificado	Fotometría de Absorción Ultravioleta y Quimiluminiscencia con Etileno	Fotometria infrarroja no dispersiva

1.2.7 Niveles de contingencia

En Chile históricamente se han establecidos niveles de contingencia, fundamentados bajo distintos enfoques, ya sea por umbrales de efectos a salud, o niveles de riesgo. Estos niveles de alerta fundamentalmente se definen basados en índices de calidad de aire, que usualmente coinciden en que el valor 100 equivale al valor norma. Usualmente el valor de alerta se define como el valor 100 o 200 del índice de calidad de aire.

Dentro de los países con niveles de contingencia para SO₂ destacan Chile, Argentina, y Sudáfrica, con valores regulados de 750, 1000, 1500 ppb, respectivamente. En general, la mayoría de los países establecen niveles de 8

horas y 24 horas para la contingencia. Por ejemplo, Brasil y Estados Unidos tienen niveles de alerta de 24 horas para SO_2 de alrededor de 300 ppb, pero no regulan episodios de menor duración.

Respecto de los niveles de contingencia para el NO_2 en los países estudiados, en general, se regulan niveles en forma similar, alrededor de 600 ppb para las alertas en Estados Unidos, Chile, y Argentina.

Para concentraciones de O_3 en los países estudiados, se observa que en general los períodos regulados para contingencia son todos de 1 hora. Se destaca la Unión Europea con niveles de 120 ppb en alerta. Estados Unidos, México, Brasil, y Chile poseen límites de 200 ppb hacia arriba. Dentro de Latinoamérica, Argentina destaca por tener el nivel más bajo de alerta, definido en 150 ppb.

Para el caso del CO , en general es un compuesto que no es considerado prioritario. Estados Unidos y Chile presentan los niveles de Alerta más bajos. Brasil, Argentina, y México presentan valores mayores.

1.2.8 Criterios de muestreo de la calidad del aire

La Unión Europea en su directiva PE-CONS 3696/07, asociada a la directiva de calidad de aire 2008/50 EU, define criterios para la evaluación de la calidad de aire del continente. Esta organización, establece que las estaciones de monitoreo, deberán situarse, a lo menos, una estación por cada dos millones de habitantes, o una por cada 50.000 km^2 . Aquellas estaciones de monitoreo que registren concentraciones de NO_2 deberán ser ubicadas a la mitad de la distancia que estaciones que midan sólo Ozono. Se exige de requerimientos de medición a lugares no habitados, e industrias que tengan provisiones de salud ocupacional adecuadas, y carreteras sin pasos peatonales.

Por su parte la EPA tiene recomendaciones para establecer redes de monitoreo específicas para el Ozono. Particularmente, distingue entre evaluar cumplimiento de la norma, desarrollar seguimiento de políticas de control de emisiones y datos para estudios de salud y calidad de aire. Para los estándares de 1 hora y 8 horas, se requieren un mínimo de dos estaciones de monitoreo para ciudades de más de 200.000 personas. Si no existe cumplimiento de norma se agregan hasta 5 estaciones, con la finalidad de hacer seguimiento de precursores, y de la formación de ozono dentro de la cuenca.

Para las estaciones se definen aquellas que representan fenómenos de micro escala y macro escala. Para la macro escala se recomienda que las estaciones viento arriba se encuentren dentro de la trayectoria de la dirección del viento preponderante matinal de la zona estudiada, y la estación viento abajo debe localizarse dentro de la dirección del viento preponderante de la tarde. La estación

viento arriba tiene por objeto medir la concentración background de Ozono, así también la concentración de sus precursores. La estación viento abajo busca encontrar el peak de Ozono.

1.3 Revisión de la eficacia y eficiencia de las norma primarias de calidad del aire en estudio

La actual red de monitoreo cubre prácticamente el 45% de la población de Chile¹⁷. Para cumplir las recomendaciones de la Comunidad Europea, considerando ciudades con más de 50.000 personas se requerirían 47 estaciones de monitoreo nuevas a un costo total de 6.415.500 USD. Esta estimación se realizó considerando el criterio establecido por la Comunidad Europea el cual establece una estación de monitoreo por cada 2 millones de habitantes. En la sección 5.1.1, se presenta el número de estaciones de monitoreo requeridas aplicando el criterio recomendado por la Comunidad Europea para cada región.

1.3.1 Nivel de cumplimiento por contaminante

De acuerdo al sitio web oficial del Sistema de Información de Calidad del aire Chile cuenta con un total de 183 estaciones de monitoreo, donde el 89% corresponden a estaciones privadas, cuyo enfoque de medición se basa en requerimientos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Esto hace que estas estaciones no se enfoquen en representatividad e impactos a salud, sino en un seguimiento de las emisiones de grandes fuentes. Por esto, muchas veces las estaciones están localizadas en lugares de máximo impacto de emisiones, lo que tiene menor utilidad para contaminantes como el Ozono.

1.3.1.1 Dióxido de azufre (SO₂).

En cuanto a calidad de aire en Chile, se observa que los centros industriales mineros persisten en niveles altos que superan norma anual y diaria de SO₂. Tanto en Calama como en Coya se ha constatado un empeoramiento reciente fruto del aumento de emisiones de SO₂ por una mayor producción de cobre.

En la Región Metropolitana, la norma de SO₂ tanto para concentraciones de 24 horas como para concentración anual son ampliamente cumplidas, encontrándose concentraciones hasta 6 veces inferiores a los límites vigentes. En la Región de Valparaíso, la mayoría de las estaciones evaluadas cumple con la norma de SO₂ para concentraciones de 24 horas. Sin embargo, se puede observar

¹⁷ Cálculo estimado considerando aquellas comunas que poseen dentro de sus límites una estación de monitoreo y criterio de existencia de un área habitada edificada dentro de un radio de 2 km contados desde la ubicación de la estación.

concentraciones anuales en las distintas estaciones cercanas al límite esto debido principalmente a la operación de la fundición de ventanas. La norma anual en cambio no es superada por ninguna estación, dando cuenta de la efectividad de los planes vigentes.

En la Región de O'Higgins, hoy en día no se cumple el límite para concentraciones de 24 horas en la estaciones de monitoreo Coya Club, Coya Población y Cipreses. Todas estas estaciones se encuentran altamente impactadas por la Fundición Caletones, la cual ha estado afecta a un plan de descontaminación que ha logrado disminuir sus emisiones en casi 90% (Ver Capítulo 7). Sin embargo, desde el año 2005 han vuelto a aumentar sus emisiones declaradas, lo que podría explicar el reciente repunte de las concentraciones de SO₂, en la estación Coya Población.

La implementación de los valores guías para SO₂ de la OMS (7.5 ppb de 24 horas) haría que todos los sectores donde existen fundiciones no cumplirían la norma (Figura 1.5, Figura 1.6 y Figura 1.7).

Un estándar de 7,5 ppb en 24 horas asegura una mayor protección a la salud humana, en especial a la población vulnerable, como menores de edad, asmáticos, tercera edad, alérgicos, entre otros. Sin embargo, la modificación propuesta por la OMS en el año 2005, podría ocasionar que en promedio se supere este nuevo estándar entre un 30% a 40%¹⁸, para algunas de las estaciones de monitoreo ubicadas en las ciudades. Es así como en la RM, por ejemplo, se tendría que las estaciones de Cerrillos, Cerro Navia, El Bosque, Independencia, Parque O'higgins, y Pudahuel (en orden de concentraciones) superarían ese valor guía.

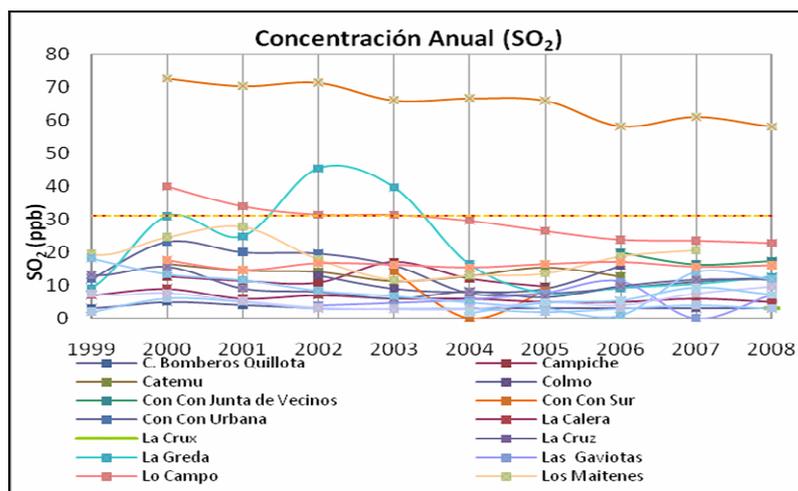


Figura 1.5. Serie de tiempo de media anual de SO₂, Quinta Región, separación por estación

¹⁸ Porcentaje obtenido a partir de valores históricos de estaciones de monitoreo. Datos disponibles en CD anexo.

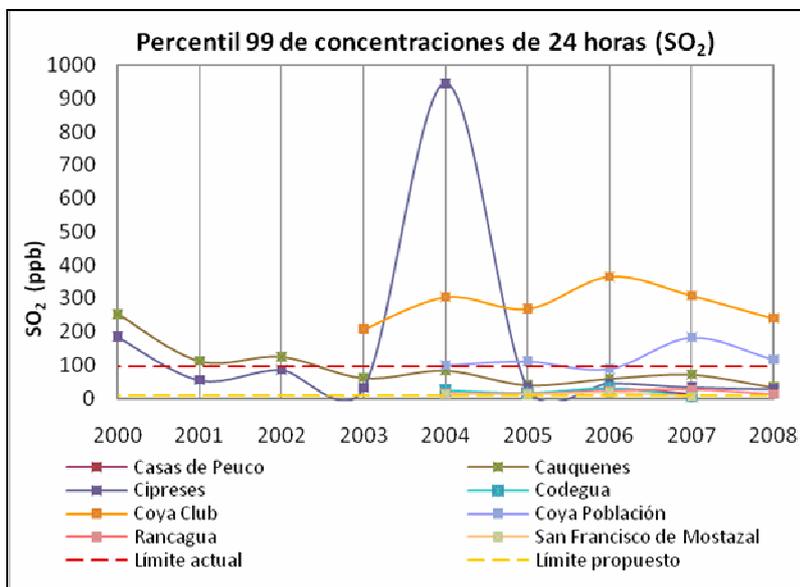


Figura 1.6. P99 de la media móvil de 24h, serie de tiempo anual, SO₂, Sexta Región, separación por estación.

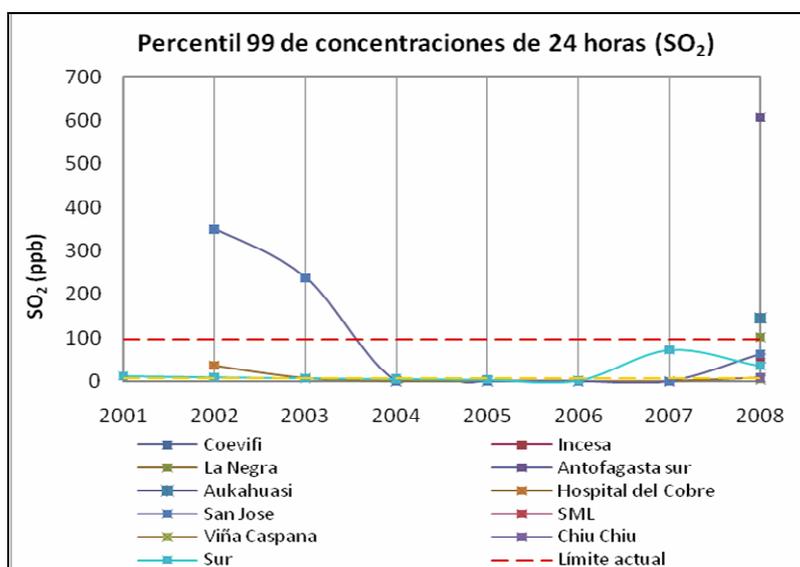


Figura 1.7. P99 de la media móvil de 24h, serie de tiempo anual, SO₂, Segunda Región, separación por estación.

1.3.1.2 Monóxido de Carbono (CO).

Las normas de calidad de aire de CO se cumplen en todas las estaciones en Chile, a excepción de algunas estaciones en Santiago (Figura 1.8 y Figura 1.9).

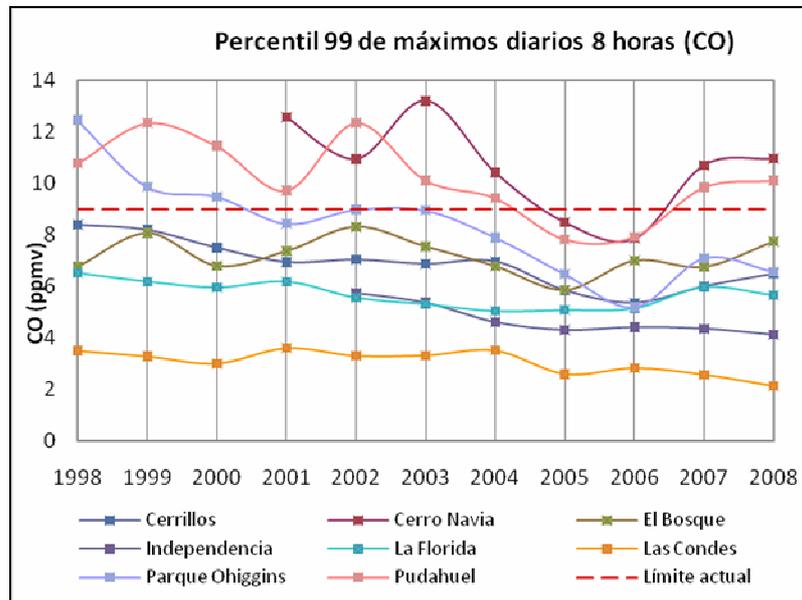


Figura 1.8. P99 de la media móvil de 8 horas, serie de tiempo anual, Monóxido de Carbono, RED MACAM, separación por estación.

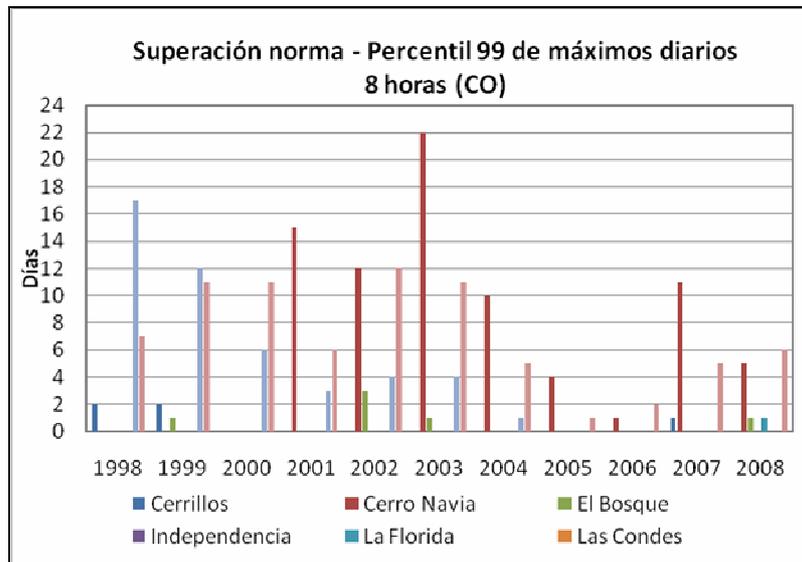


Figura 1.9. Días por sobre norma de calidad de aire de CO 8 horas, serie de tiempo anual, separado por estaciones individuales de MACAM

1.3.1.3 Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

La norma actual de NO₂ se cumple en todo el territorio nacional. Concentraciones de NO₂ horaria y anual superan los valores guías de la OMS en la Sexta Región (Casas de Peuco, Figura 1.10), Quinta Región (La Calera, Figura 1.11), y Región

Metropolitana (Las Condes, Figura 1.12). La norma actual de NO₂, no se cumple en Las Condes, La Florida y Parque O'Higgins, esto se atribuye fundamentalmente a las emisiones areales de compuestos orgánicos volátiles, incluidas fuentes residenciales y móviles.

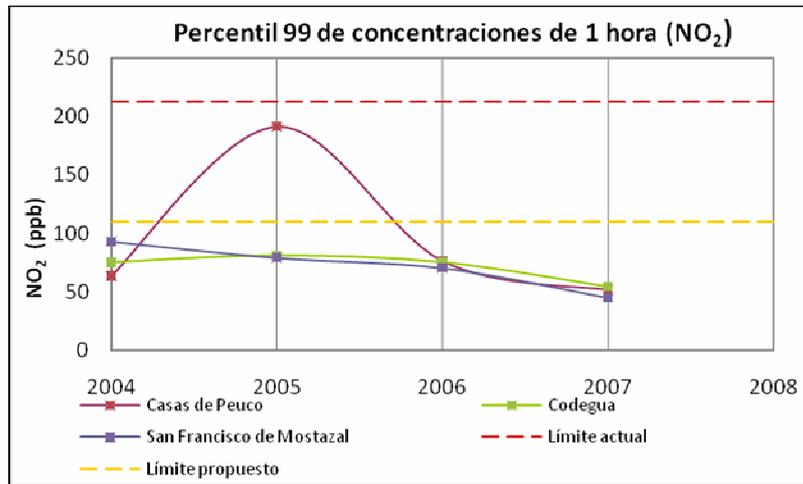


Figura 1.10. P99 de la media móvil de 1 hora, serie de tiempo anual, NO₂, Sexta Región, separación por estación

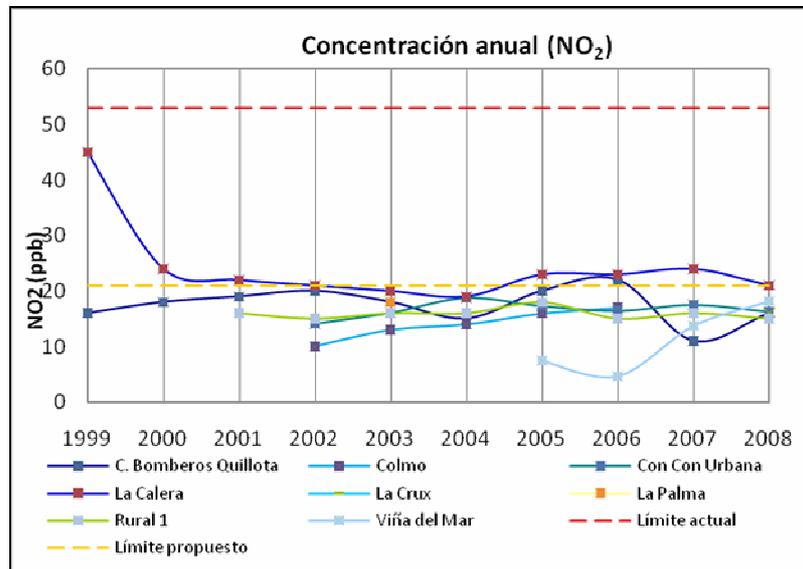


Figura 1.11. Serie de tiempo de media anual de NO₂, Quinta Región, separación por estación.

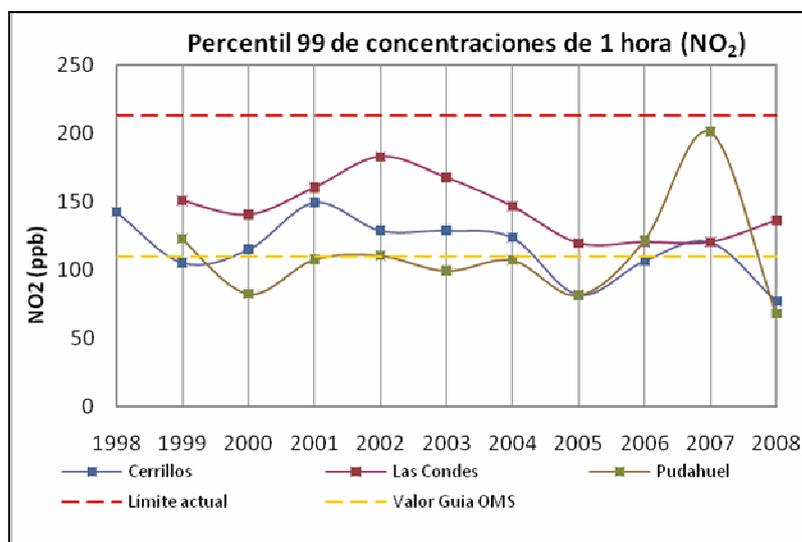


Figura 1.12. P99 de la media móvil de 1 hora, serie de tiempo anual, NO₂, RED MACAM, separación por estación.

1.3.1.4 Ozono (O₃)

En la Quinta Región en tanto, no se cumple la norma de O₃ en San Pedro, La Cruz, y Quillota (Figura 5.21), probablemente debido a las emisiones de Óxidos de Nitrógeno de grandes fuentes industriales, como termoeléctricas y cementeras. Sin embargo, la norma está siendo cumplida en Viña del Mar.

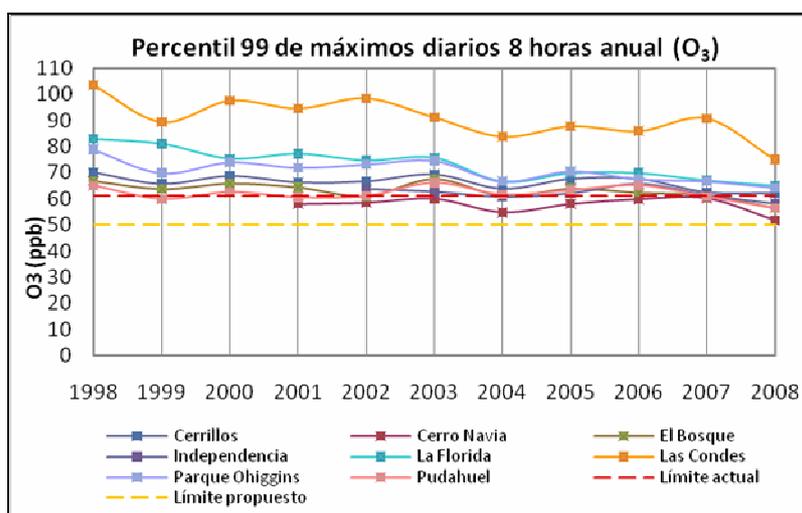


Figura 1.13. P99 de la media móvil de 8 horas, serie de tiempo anual, Ozono, RED MACAM, separación por estación.

En la Sexta Región el no cumplimiento de la norma de O₃ ocurre en Codegua, Casas de Peuco, y San Francisco de Mostazal (Figura 5.32), lo que podría atribuirse a emisiones de NO_x debido a las termoeléctricas de Candelaria y San Francisco.

Los valores guías de Ozono de la OMS no se cumplirían en ninguna estación de monitoreo en Santiago.

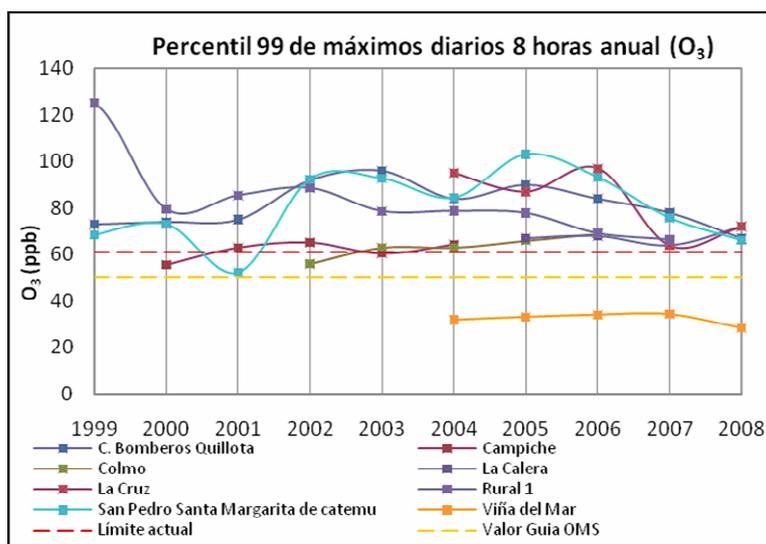


Figura 1.14. P99 de la media móvil de 8 horas, serie de tiempo anual, Ozono, Quinta Región, separación por estación.

1.4 Establecimiento de los riesgos asociados a las actuales condiciones de calidad del aire y beneficios en salud asociados a la incorporación de las normas propuestas

1.4.1 Riesgos asociados a las actuales condiciones de calidad del aire

Para lograr la estimación de los beneficios sociales que tendrían las Normas Primarias de Calidad del Aire se realizó un análisis de riesgo cuantitativo, el cual consistió en una modelación cuantitativa de la relación entre la concentración de los contaminantes en los cuales se han propuesto cambios a la normativa actual (NO₂, SO₂ y O₃), exposición de la población a estos contaminantes, efectos en salud (agudos o crónicos) y valoración económica de dichos efectos en salud, los cuales serían una medida de los daños dados por las actuales concentraciones de contaminantes. Este análisis de riesgo cuantitativo y valoración para las condiciones actuales de exposición a NO₂, SO₂ y O₃ se realizó para las comunas de la RM, II, V y VI Región.

Primeramente, para estimar los casos de una determinada enfermedad o efecto en salud que se observa en la población se utilizan ecuaciones basadas en los

modelos de Poisson. Este modelo estadístico es ampliamente usado en estudios epidemiológicos longitudinales (tales como los estudios que asocian mortalidad diaria con las concentraciones de contaminantes). Usando este modelo, se puede calcular el número esperado de casos asociado a una determinada concentración de contaminantes (Ecuación 2):

Ecuación 1:

$$E[\text{Efectos}(c_i)] = \text{Tasa}(c_i = 0) \cdot \text{Población} \cdot (\exp(\beta_i \Delta c_i) - 1)$$

Donde:

Tasa ($c_i=0$): Tasa base de los efectos. Cantidad de efectos en salud observados por unidad de tiempo para el caso que la concentración de contaminante i sea cero.

Población: número de habitantes de la población en estudio y que se encuentra expuesta al contaminante i .

El factor $(\exp(\beta_i \Delta c_i) - 1)$ estima el porcentaje o fracción de aumento del número de casos asociados a la reducción en concentración de contaminantes Δc_i . En este caso consideramos una diferencia entre las condiciones actuales y niveles de concentración de **cero**, esto es, se evalúa el riesgo total de estar expuesto a los niveles actuales de contaminantes y son comparados con una situación en que no hubieran contaminantes. El valor β_i proviene de los estudios epidemiológicos publicados e implica el aumento en la tasa de enfermedad por cada aumento en la concentración de contaminantes.

Como población de estudio se usó la población de la provincia de Santiago de la Región Metropolitana y de comunas de la II, V y VI regiones. Estas provincias constan de 32 comunas las cuales concentran la mayor parte de la población de la región metropolitana y también del país. La población de cada comuna se estimó para el año 2008 tomando como base los datos del censo del 2002 (INE) y usando las tasas de crecimiento (INE) para cada comuna si estuviere disponible. La población de cada comuna se desagregó en la población total y la población de adultos. Como adultos se consideraron los individuos de edad entre 15 y 64 años.

La exposición de la población de las distintas comunas se estimó usando las mediciones disponibles durante el año 2008. Para Santiago, durante dicho año se encuentran mediciones disponibles en 8 estaciones. Para el resto de las comunas se usó la estación disponible dentro de la comuna.

Los riesgos fueron valorizados económica y socialmente usando 3 escenarios. Sólo se consideraron los efectos en salud que pueden ser cuantificados y valorizados monetariamente.

Como tasa base para cada uno de los efectos en salud de preferencia se usaron datos nacionales y en forma secundaria tasas informadas en estudios anteriores.

Como estimadores del riesgo en salud por exposición a O_3 se usaron los estimados usados en un estudio anterior hecho para 3 ciudades de América Latina, incluyendo Santiago, y el cual está disponible en la literatura internacional (Cifuentes et al. 2001), para los cuales se privilegiaron los valores obtenidos en estudios locales (de Chile) o de estudios en América Latina (por ejemplo, México)

Como resultado de este análisis se pudo observar que la mayor cantidad de efectos se aprecian para O_3 en las comunas de Santiago. Esto se debe a la gran cantidad de población expuesta y a las altas concentraciones observadas. Respecto a los costos, los mayores están asociados a la exposición a O_3 en las comunas de las RM dada la gran concentración de este contaminante, alta población expuesta y el alto impacto de los efectos en salud estimados, sobre todo el aumento en la mortalidad aguda. Adicionalmente, se observan efectos por reducción en SO_2 en ciudades de la II y VI Región impactadas por la industria de la minería.

Finalmente, ninguna de las metodologías mencionadas y utilizadas en la estimación del presente estudio está libre de problemas, presentando ventajas y desventajas.

En cuanto a la valoración del riesgo por mortalidad prematura, existen distintos factores que la afectan, como son si el riesgo de muerte se asume de manera voluntaria o involuntaria, las distintas valoraciones según el rango etario de la población, según su estado de salud, etc., factores que deben ser considerados al momento de estimar el valor estadístico de una vida. Por otra parte, hay que considerar los sesgos propios de la aplicación de una encuesta (fallas en diseño, sesgos de información, etc).

Frente a la morbilidad, por otro lado, una metodología completa de valoración debería incluir todos los aspectos anteriormente mencionados al momento de evaluar costos de una enfermedad, lo que por supuesto no es posible.

La valoración contingente, que es un método de preferencia hipotética basada en encuestas, consultando de distintas maneras la disponibilidad a pagar para obtener un bien ambiental o para evitar un perjuicio a un conjunto representativo de una población objetivo, conlleva distintos sesgos, entre los que destaca el sesgo de la hipótesis, consistente en que las personas no tienen mayores incentivos para dar una respuesta correcta, entregando cifras de disposición a pagar sin una mayor reflexión.

A pesar de que lo ideal sería contar con información acerca de la disponibilidad de pago en el escenario nacional, tal metodología implica un elevado uso de recursos

para el diseño de encuesta y el trabajo de campo, lo que aún no se ha realizado en nuestro país. Además de ello, según lo expresado por Holz (Holz 2000), los resultados de un estudio de ese tipo aplicado a un país como Chile serían inciertos, ya que probablemente la población carezca de las herramientas para responder a las preguntas, tales como información sobre los costos y beneficios, poca costumbre para valorar ese tipo de bienes, etc.

1.4.2 Beneficios en salud asociado a la incorporación de las normas propuestas

Para lograr la estimación de los beneficios sociales que tendrían los cambios en las Normas Primarias de Calidad del Aire, se realizó un análisis de riesgo cuantitativo, que consiste en una modelación cuantitativa de la relación entre concentración de contaminantes en el medio ambiente, exposición de la población a estos contaminantes, efectos en salud y valoración económica de dichos efectos en salud, los cuales serían una medida de los beneficios/daños obtenidos por los cambios en las concentraciones de los contaminantes y bienestar social.

Para determinar los beneficios en salud se utilizó el mismo método que para determinar los riesgos asociados a las actuales condiciones de calidad del aire. Con la excepción que en el modelo de riesgo, en vez de estimar el riesgo con respecto a una situación de concentración **ceró**, se compara con una situación en que las concentraciones cumplen las normas propuestas en este estudio¹⁹.

Como resultado de este análisis, se determinó el número de casos evitados producto de la reducción en concentraciones de contaminantes asociadas a la incorporación de las normas propuestas.

Los mayores beneficios se encontraron por la potencial reducción a exposición a O₃ en las comunas de las RM. Esto se debe a la gran cantidad de población expuesta y a los niveles de O₃ observados en estas comunas.

Adicionalmente, se observan efectos por reducción en SO₂ en ciudades de la II, V y VI región impactadas por la industria de la minería. Se hace notar que estas comunas tendrían los nuevos estándares ampliamente excedidos por lo que se requeriría reducciones mayores en las emisiones para cumplir los estándares propuestos.

Para comprobar la efectividad en la reducción tanto de SO₂ y NO_x, es posible valorizar la reducción de PM_{2.5}, dado que ambos contaminantes también constituyen elementos precursores de la formación del material particulado PM_{2.5},

¹⁹ La propuesta sobre cambios normativos se presenta en el capítulo 9 de este estudio, al igual que en el punto 1.6, del presente resumen ejecutivo.

y que además, se cuenta con métodos apropiados para valorar la reducción de este contaminante.

Estas reducciones se verían asociadas a una disminución importante en la morbilidad de la población.

Los beneficios asociados a las reducciones fueron valorizados económica y socialmente usando 3 escenarios. Los mayores beneficios están asociados a las reducciones en exposición a O₃ en las comunas de las RM dada la gran concentración de este contaminante, alta población expuesta y el alto impacto de los efectos en salud estimados, sobre todo el aumento en la mortalidad aguda.

1.5 Revisión de las principales fuentes emisoras de Dióxido de Azufre, Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Monóxido de Carbono. Estimación de los potenciales de reducción

Se realizó una revisión general de las principales fuentes de los contaminantes relativos a las normas de calidad analizadas. Además, se estableció una aproximación al potencial de reducción de emisiones para diversas fuentes emisoras. En este análisis se ha revisado el potencial de reducción de emisiones de Dióxido de Azufre para las fundiciones de Cobre y para las Termoeléctricas, el potencial de reducción de emisiones para Dióxido de Nitrógeno en centrales termoeléctricas y fuentes móviles, el potencial de reducción de emisiones para Monóxido de Carbono en fuentes móviles y una descripción de la formación de Ozono en la atmósfera.

1.5.1 Dióxido de Azufre (SO₂)

En el país, las emisiones de Dióxido de Azufre a la atmósfera están relacionadas principalmente con los procesos de fusión y refinación de cobre. Específicamente durante la quema de combustibles fósiles en la tostación, sintetización, fusión, conversión o refinado del metal sulfuroso (este último da cuenta de las mayores emisiones).

A nivel nacional existen siete fundiciones, de las cuales cinco se encuentran en zonas que han sido sometidas a planes de descontaminación atmosféricos (PPDA) debido a las deficientes condiciones de calidad de aire.

En los últimos años ha ocurrido una importante reducción de las emisiones de Dióxido de Azufre proveniente de las fundiciones de Cobre, esta reducción ha estado asociada a los planes de descontaminación de las áreas circundantes a esta actividad industrial.

Fundiciones como Chuquicamata y Caletones han tenido una reducción de emisiones entorno al 50% en el periodo 2002-2008, otras como Ventanas y Paipote han tenido reducciones en torno al 30% en este mismo periodo. Esto debido al cambio tecnológico que han experimentado la fundiciones mediante la implementación de plantas de ácido sulfúrico y reemplazo de hornos reverberos por hornos de mejor tecnología (hornos flash, convertidores tenientes, hornos eléctricos de limpieza).

Si bien estas fundiciones han reducido sus emisiones en forma considerable existe un alto potencial de reducción de emisiones en el sector del 82%, estimado en base a un aumento de eficiencia de las fundiciones para el procesamiento del concentrado de cobre. Se ha considerado, en esta estimación, que cada fundición puede llegar al nivel de eficiencia de la fundición Chagres 10.69 [kg SO₂/ton cobre procesado], la más eficiente. Esta reducción de emisiones por parte de las fundiciones podría ser lograda tras una serie de mejoras tecnológicas tales como, incorporación de hornos flash (que permite mejorar la recuperación de SO₂), incorporación de captación de gases fugitivos mediante campanas secundarias/terciarias, reemplazo de procesos batch por procesos continuos y mejores prácticas en la operación.

En el caso de las emisiones de SO₂ provenientes de las termoeléctricas, existe un importante potencial de reducción de emisiones asociado al uso de tecnologías de control de emisiones. El uso de desulfurizadores, tecnología no utilizada en el país actualmente, posee un gran potencial debido a la alta eficiencia en la remoción que posee. Se ha estimado en esta evaluación la reducción de emisiones tras el uso de desulfurización húmeda, semiseca y con agua de mar con lo que se ha obtenido una reducción de 98%, 94% y 90%, respectivamente.

1.5.2 Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Dentro de las fuentes fijas, tiene una importante contribución el sector termoeléctrico. En este sector existe un importante potencial de reducción de emisiones asociado al uso de tecnologías de tipo primario (inhibición de la formación del contaminante, ejemplo quemadores de bajo NO_x) y de tipo secundario (remoción del contaminante ya generado, ejemplo sistemas de reducción catalítica selectiva).

En base al uso de quemadores de bajo NO_x y sistemas de reducción selectiva no catalítica (SNCR) para turbinas a vapor y al uso de Sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) para todas las tecnologías de generación, se ha estimado la reducción de emisiones asociada al uso de estas tecnologías, con lo que se ha obtenido una reducción de 35%, 37% y 95% con el uso de quemadores de bajo NO_x, SNCR y SCR, respectivamente.

Dentro de las fuentes móviles, que corresponden al 45% de las emisiones totales de NOx a nivel país, un 50% corresponde a emisión proveniente de vehículos livianos y un 25% a buses.

En este capítulo se ha tratado en forma separada al parque automotriz asociado a la región Metropolitana del parque asociado al del resto del país, ya que se tiene diferencias tecnológicas considerables. En la región Metropolitana se tiene un avance importante respecto del resto del país en el transporte público, teniéndose la norma Euro III mayoritariamente homologada (72% de los buses poseen este estándar). Pese a ello, aún se tiene un importante potencial de reducción de emisiones asociado al uso extensivo de la norma de Euro IV, con lo que se tendría una reducción de emisiones en torno al 50%. En el resto del país, la norma que cumplen los buses de transporte público es la norma Euro II, principalmente, razón por la cual la homologación de la norma Euro III tiene asociado una alta reducción de emisiones (40%).

Para el caso de los vehículos livianos también se tiene una diferencia tecnológica entre la Región Metropolitana y el resto del país, debido a la entrada de vehículos Euro III a partir de 2005 para la Región Metropolitana. Se ha estimado en este caso la reducción de emisiones tras la utilización de la norma Euro IV para todo el parque con lo que se ha obtenido una reducción del 80%. Para el resto del país se ha supuesto la homologación de la norma Euro II con lo que la reducción llega al 56%.

1.5.3 Monóxido de Carbono (CO)

Dado que las principales fuentes de Monóxido de Carbono son las móviles (71%) se ha realizado el análisis del parque automotriz considerando vehículos livianos ya que ellos son responsables del 95% de las emisiones de este contaminante. Para ello se ha hecho un análisis en forma separada para Región Metropolitana y el resto del país.

Como se describió anteriormente en la Región Metropolitana el parque de vehículos livianos posee la norma de emisiones Euro III, por lo que la reducción de emisiones se ha estimado con la homologación de la norma Euro IV, con lo que se tiene un 72% de reducción de emisiones. Para el resto del país se ha considerado la homologación de la norma Euro II con lo que se tendría una reducción total del 35%. Sin duda, la homologación a nivel país de la norma Euro III o IV, consistiría en una alternativa para reducir las emisiones de CO, dado que existe evidencia de problemas atmosféricos en ciudades del sur de Chile tales como Rancagua, Talca, entre otras.

1.5.4 Ozono (O₃)

La formación de Ozono está dada por una serie de reacciones complejas entre Óxidos de Nitrógeno (NO_x), hidrocarburos, Monóxido de Carbono (CO), mediados por la presencia de la luz solar.

En lugares sin grandes actividades industriales las emisiones de NO_x están dominadas por el sector de transporte y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) están dominadas por fuentes residenciales, fundamentalmente emisiones de hidrocarburos livianos como propano y metano (48% emisiones). Para poder regular la exposición al Ozono, es necesario considerar sus mecanismos de formación.

En un régimen limitado por emisiones de NO_x, la reacción terminal de ácido nítrico no es dominante, sino la destrucción de radicales de HO₂. La formación de Ozono está limitada por la reacción entre HO₂ y RO₂ con NO. Es decir, se forma más Ozono mientras más emisiones de NO_x existan. Así, si existen más emisiones de COVs, aumentará también la formación de Ozono.

Un régimen limitado por emisiones de COVs ocurre cuando el sumidero de radicales dominante es el ácido nítrico (por exceso de NO₂), y la formación de Ozono está limitada por la reacción de oxidación de CO y COVs por OH (los que generan HO₂). Caso interesante es que la formación de Ozono aumenta si es que disminuyen las emisiones de NO_x en un régimen COV limitado.

Normalmente grandes centros urbanos muestran características de COV limitados y localidades más remotas y rurales son NO_x limitado. Por lo tanto, el éxito de las estrategias de reducción de formación de Ozono depende de si, la reducción de sus precursores es apropiada para el régimen de formación. Es importante entonces, hacer seguimiento del impacto de nuevas fuentes de Óxidos de Nitrógeno en localidades semi rurales. Así además, es importante desarrollar planes que tengan por objeto cumplir normas de Ozono en conjunto con Material Particulado, para el caso de Santiago. En tal caso se recomienda hacer una revisión de métodos de reducción de precursores de Ozono como los COVs, específicamente enfocado a aquellos que por abundancia y/o por reactividad (propano, derivados de petróleo) den cuenta de la formación de Ozono.

1.6 Propuesta de Cambio en la normativa

Considerando los antecedentes estudiados, se ha establecido la siguiente propuesta de cambio a las normativas. Las Tabla 1.6, Tabla 1.7 y Tabla 1.8, muestran las propuestas de cambio a la normativa vigente para SO₂, NO₂, O₃ y CO; y el motivo de la recomendación.

Tabla 1.6. Propuesta de cambio en la normativa

Contaminante	Métrica	Valor vigente en Chile (2009)	Propuesta	Fundamento
SO ₂	Anual	31 ppb [80 µg/m ³]	Mantener o modificar/eliminar en función de la incorporación de norma de corto plazo de 1 hora.	La norma actual protege a la población de los efectos de exposición de largo plazo, no sería necesaria si existiera una norma de corto plazo de 1 hora que cumpliría el objeto de disminuir exposición crónica también.
SO ₂	Diario	96 ppb [250 µg/m ³]	Considerar modificación al valor guía OMS del año 2005 7,5 ppb [20 µg/m ³].	Norma OMS toma en cuenta evidencia reciente de efectos de SO ₂ en mortalidad, basado en datos diarios en Hong Kong, muestra baja de 2% al 4% de mortalidad, presentados en Guía OMS de 2005. Un estándar de 7,5 ppb en 24 horas asegura una mayor protección a la salud humana, en especial a la población vulnerable, como menores de edad, asmáticos, tercera edad, alérgicos, entre otros. Sin embargo, la modificación propuesta por la OMS en el año 2005, podría ocasionar que en promedio se supere este nuevo estándar entre un 30% a 40% ²⁰ , para algunas de las estaciones de monitoreo ubicadas en las ciudades. Es así como en la RM, por ejemplo, se tendría que las estaciones de Cerrillos, Cerro Navia, El Bosque, Independencia, Parque O'higgins, y Pudahuel (en orden de concentraciones) superarían ese valor guía.
SO ₂	1 hora	No existe actualmente (2010)	Considerar modificación de norma en el rango sugerido por EPA 50 a 150 ppb [133 a 400 µg/m ³]	Norma de corto plazo en estudio por EPA busca proteger a asmáticos de exposiciones cortas de SO ₂ que generan morbilidad respiratoria. Norma de corto plazo de la OMS de 10 minutos se basa en estudios de asmáticos, y es difícil de regular por instrumentos normativos. Norma de 1 hora puede cumplir el mismo objetivo.

²⁰ Porcentaje obtenido a partir de valores históricos de estaciones de monitoreo. Datos disponibles en CD anexo.

Contaminante	Métrica	Valor vigente en Chile (2009)	Propuesta	Fundamento
NO ₂	Anual	53 ppb [100 µg/m ³]	Implementar norma de OMS: 21 ppb [40 µg/m ³].	<p>El estudio principal que documenta los efectos del NO₂ sobre los síntomas respiratorios de niños es el de meta-análisis de Hasselbal²¹, éste muestra caída en función pulmonar en niños por exposición crónica. Otros estudios realizados por Gauderman²² importantes encontraron que la exposición crónica a NO₂ estaba asociada a caídas persistentes en el tiempo de función respiratoria.</p> <p>Si se aplica el valor Guía e la OMS propuesto, en las estaciones de la Región de O'Higgins se estaría cumpliendo la norma en prácticamente todas las estaciones evaluadas.</p>
NO ₂	1 hora	213 ppb [400 µg/m ³]	Implementar norma de OMS: 110 ppb [200 µg/m ³]	<p>El estudio clínico de meta-análisis de Folinsbee²³ muestra efectos en la función respiratoria ante la exposición en cámaras en asmáticos. Los resultados del estudio muestran un aumento significativo en la resistencia aérea en alrededor del 70% de los sujetos asmáticos después de ser expuestos a concentraciones de 200 a 300 ppb [376 a 564 µg/m³] por media hora. Además, muestra el aumento en reacción alérgica por exposición a NO₂.</p> <p>En RM las estaciones sólo las Condes, Cerrillos y Pudahuel han medido NO₂ durante varios años. El año 2009, se ha empezado a reportar NO₂ en el resto de las estaciones, por lo que es difícil evaluar el cumplimiento las tendencias fuera de las estaciones mencionadas.</p> <p>En la V Región en tanto, la norma de 1 hora actual prácticamente no es superada, pero implementar la norma OMS ocasionaría que estos valores se encontrasen en el límite, lo que eventualmente ocasionaría superación.</p>

²¹ Hasselblad, V., Eddy, D.M., and Kotchmar, D.J. (1992). Synthesis of environmental evidence: nitrogen dioxide epidemiology studies. *J Air Waste Manage Assoc* 42, 662-671.

²² Gauderman, W.J., Avol, E., Lurmann, F., Kuenzli, N., Gilliland, F., Peters, J., and McConnell, R. (2005). Childhood asthma and exposure to traffic and nitrogen dioxide. *Epidemiology* 16, 737-743.

Gauderman, W.J., Gilliland, G.F., Vora, H., Avol, E., Stram, D., McConnell, R., Thomas, D., Lurmann, F., Margolis, H.G., Rappaport, E.B., *et al.* (2002). Association between air pollution and lung function growth in southern California children: results from a second cohort. *Am J Respir Crit Care Med* 166, 76-84.

Gauderman, W.J., McConnell, R., Gilliland, F., London, S., Thomas, D., Avol, E., Vora, H., Berhane, K., Rappaport, E.B., Lurmann, F., *et al.* (2000). Association between air pollution and lung function growth in southern California children. *Am J Respir Crit Care Med* 162, 1383-1390.

²³ Folinsbee, L.J. (1992). Does nitrogen dioxide exposure increase airways responsiveness? *Toxicol Ind Health* 8, 273-283.

Contaminante	Métrica	Valor vigente en Chile (2009)	Propuesta	Fundamento
O ₃	8 horas	61 ppb [120 µg/m ³]	Implementar norma de OMS: 50 ppb [100 µg/m ³]	<p>Nuevos estudios (Bell, 2005²⁴; Gryparis, 2004²⁵; Ito, 2005²⁶; y Levy, 2005²⁷), muestran una asociación entre O₃ y aumento de mortalidad. Un estándar de esta naturaleza mantendría el exceso de muertes por debajo del 2% diario.</p> <p>El estudio de Horstman, (1990)²⁸, encontró indicaciones de obstrucción pulmonar e hiperreactividad de las vías aéreas en jóvenes adultos cuando fueron expuestos a concentraciones de O₃ entre 80 y 100 ppb [160 a 200 µg/m³] por 6 horas.</p> <p>Si se se aplicara el valor guía del año 2005 de la OMS, todas las estaciones de monitoreo de la RM tendrían superación de norma durante el año, particularmente Las Condes, (137 superaciones), La Florida (67 superaciones), y Parque O'higgins (51 superaciones). Similar situación ocurriría tanto en la Región de Valparaíso como en la Región de O'Higgins.</p>
CO	1 hora	26 ppm [28 µg/m ³]	Mantener	No existen nuevos antecedentes científicos, norma actual en el rango de la OMS.
CO	8 horas	9 ppm [10 µg/m ³]	Mantener	No existen nuevos antecedentes científicos, norma actual en el rango de la OMS.

²⁴ Bell, M.L., Dominici, F., and Samet, J.M. (2005). A meta-analysis of time-series studies of ozone and mortality with comparison to the national morbidity, mortality, and air pollution study. *Epidemiology* 16, 436-445.

²⁵ Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyanni, K., Analitis, A., Touloumi, G., Schwartz, J., Samoli, E., Medina, S., Anderson, H.R., Niciu, E.M., *et al.* (2004). Acute effects of ozone on mortality from the "air pollution and health: a European approach" project. *Am J Respir Crit Care Med* 170, 1080-1087

²⁶ Ito, K., De Leon, S.F., and Lippmann, M. (2005). Associations between ozone and daily mortality: analysis and meta-analysis. *Epidemiology* 16, 446-457

²⁷ Levy, J.I., Chemerynski, S.M., and Sarnat, J.A. (2005). Ozone exposure and mortality: an empiric bayes metaregression analysis. *Epidemiology* 16, 458-468

²⁸ Horstman, D.H., Folinsbee, L.J., Ives, P.J., Abdul-Salaam, S., and McDonnell, W.F. (1990). Ozone concentration and pulmonary response relationships for 6.6-hour exposures with five hours of moderate exercise to 0.08, 0.10, and 0.12 ppm. *The American review of respiratory disease* 142, 1158-1163

Tabla 1.7. Recomendación respecto de criterio de completitud de los datos, criterio de excedencia y monitoreo

Contaminante	Métrica	Completitud	Criterio de Excedencia	Monitoreo
SO ₂	Anual	No se recomienda cambio, dado que el criterio de 75% de existencia de datos es ampliamente utilizado a nivel internacional.	Se recomienda considerar solamente el último año de mediciones, si es que no se deroga la norma	No se recomiendan cambios a nivel de tipo de estaciones de monitoreo, pero se recomienda cambios respecto del aumento de la cobertura de acuerdo a análisis realizado en sección 3.8.
SO ₂	Diario		Se recomienda declarar saturada aquellas zonas que no cumplan norma 1 año, y no esperar tres años de superación.	No se recomiendan cambios a nivel de tipo de estaciones de monitoreo, pero se recomienda cambios respecto del aumento de la cobertura de acuerdo a análisis realizado en sección 3.8.
SO ₂	1 hora		Además, se aconseja disminuir la excedencia permitida desde 4 días (percentil 99) a 1 día (percentil 99.75).	
NO ₂	Anual	No se recomienda cambio, dado que el criterio de 75% de existencia de datos es ampliamente utilizado a nivel internacional.	Se recomienda declarar saturado aquellas zonas que no cumplan norma 1 año, y no esperar tres años de superación.	Se recomienda establecer estaciones de monitoreo de máxima exposición (ejemplo: autopistas, rutas, etc.), de acuerdo a la propuesta de norma y efectos en salud.
NO ₂	1 hora		Se recomienda declarar saturada aquellas zonas que no cumplan norma 1 año, y no esperar tres años de superación. Además, se aconseja disminuir la excedencia permitida desde 4 días (percentil 99) a 1 día (percentil 99.75).	
O ₃	8 horas	No se recomienda cambio, dado que el criterio de 75% de existencia de datos es ampliamente utilizado a nivel internacional.	Se recomienda mantener criterio de media trianual de percentil 99 de los máximos diarios de la media de 8 horas, debido a que políticas de control de emisiones de precursores que podrían tener efectos no lineales, además de que obedecen a políticas de largo plazo.	Se recomienda agregar el compuesto NO _x a la red de monitoreo de calidad de aire para localidades saturadas en Ozono.
CO	1 hora	No se recomienda cambio, dado que el criterio de 75% de existencia de datos es ampliamente utilizado a nivel internacional	Se recomienda declarar saturada aquellas zonas que no cumplan norma 1 año, y no esperar tres años de superación.	Se recomienda establecer estaciones de monitoreo de máxima exposición, de acuerdo a efectos en salud.
CO	8 horas		Además, se aconseja disminuir la excedencia permitida desde 4 días (percentil 99) a 1 día (percentil 99.75).	No se recomiendan cambios a nivel de tipo de estaciones de monitoreo, pero se recomienda cambios respecto del aumento de la cobertura.

Tabla 1.8. Recomendación respecto de principio de monitoreo

Contaminante	Método actual	Propuesta de cambio
SO ₂	Fluorescencia ultravioleta Espectrometría de absorción diferencial con calibración in-situ o Método equivalente propuesto por EPA o CE.	El principio más utilizado en las estaciones de monitoreo chilenas es la fluorescencia ultravioleta, no se recomienda cambio en el método de medición ya que este presenta el estado del arte actual
NO ₂	Quimioluminiscencia Métodos basados en método modificado de Griess-Saltzman Espectrometría de absorción óptica diferencial, con calibración in-situ Método equivalente propuesto por EPA o CE.	El principio más utilizado en las estaciones de monitoreo chilenas es la quimioluminiscencia, este método es ampliamente utilizado por la mayoría de los países incluido Estados Unidos y recomendado por la comunidad Europea. No se recomienda el método de Griess-Saltzman modificado ya que tiene menos sensibilidad, y presenta posibles interferencias por cloruro de sodio.
CO	Fluorescencia ultravioleta Espectrometría de absorción diferencial con calibración in-situ o Método equivalente propuesto por EPA o Comunidad Europea.	El principio más utilizado a nivel internacional y a nivel nacional es la espectrometría de absorción diferencial. Por esto y el hecho de que es el método de recomendado por la EPA, no se recomienda cambios en la metodología
O ₃	Quimioluminiscencia con etileno Fotometría de absorción ultravioleta Cromatografía líquida gas/ sólido Espectrometría de absorción óptica diferencial Método equivalente propuesto por EPA o CE.	El principio más utilizado por estaciones de monitoreo es fotometría de absorción ultravioleta, no se recomienda cambio de método ya que este también es el de referencia para Comunidad Europea y EPA. Se recomienda retirar como método aceptado la quimioluminiscencia de etileno, ya que este método puede tener interferencias en lugares con muchos hidrocarburos, como es el caso de áreas urbanas.