

1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Introducción

Las normas primarias de calidad de aire son instrumentos preventivos orientados a proteger la salud de la población, de aquellos efectos adversos generados por la exposición a los contaminantes⁸.

En Chile, la primera regulación que estableció estándares de calidad del aire se dictó el año 1978, a través de la Resolución N° 1.215 del Ministerio de Salud⁹, denominada “Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica”. La Resolución incluyó niveles permitidos de calidad de aire para los contaminantes: monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y partículas totales en suspensión (PTS).

En particular para el contaminante SO₂, la Resolución estableció estándares en concentración anual y de 24 horas, cuyos valores fueron de 80 µg/m³N y de 365 µg/m³N respectivamente. Cabe destacar, que los valores para el SO₂ normados en ese entonces, correspondieron a los mismos estándares del año 1971 de los Estados Unidos.

Posteriormente, el año 1992, a través del Decreto Supremo N° 185 del Ministerio de Minería¹⁰, se estableció y mantuvo para el SO₂ los mismos valores contenidos en la Resolución N° 1.215. Además, el Decreto incluyó por primera vez tres niveles de emergencia ambiental¹¹ para concentraciones de una hora para las siguientes situaciones: i) aviso de alerta: 0,75 ppm (1.962 µg/m³N); ii) aviso de advertencia: 1,00 ppm (2.616 µg/m³N); y iii) aviso de emergencia: 1,5 ppm (3.924 µg/m³N). Los niveles de emergencia tienen por objetivo reducir la exposición de la población vulnerable y sensible, de los efectos adversos y agudos del SO₂.

En 1999, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), inició la revisión de todas las normas primarias de calidad del aire contenidas en la Resolución 1.215, culminando con la publicación de varios decretos, entre ellos el D.S. N° 113 del MINSEGPRES, publicado en el Diario Oficial el 6 de marzo de 2003, en el cual se estableció la norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre (SO₂).

⁸ Artículo 2° Decreto Supremo N° 38 del 2013, del Ministerio del Medio Ambiente: “Reglamento para la dictación de normas de calidad ambiental y de emisión”. Define por norma primaria de calidad como aquella que se 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 la salud de la población, definiendo los niveles que originan situaciones de emergencia.

⁹ No publicada en el Diario Oficial.

¹⁰ Publicado el 16 de enero de 1992 en el Diario Oficial.

¹¹ Artículo 19°, D.S. N° 185 del Ministerio de Minería.

El decreto supremo N° 113, actualmente vigente, tiene como objetivo proteger la salud de la población de aquellos efectos agudos y crónicos generados por la exposición del SO₂. Para esto, el decreto mantiene el estándar anual que se estableció el año 1978 de 80 µg/m³N; redujo el estándar de 24 horas de 365 µg/m³N a 250 µg/m³N (Art. 3° y Art. 4°); y mantiene los mismos valores que se establecieron el año 1992 para los niveles que originan situaciones de emergencia (Art. 5°).

Cabe hacer notar que una vez publicado el decreto en el Diario Oficial, la norma primaria de calidad del aire de SO₂ de 24 horas y anual, así como los niveles que originan emergencia, entraron en vigencia a partir del año 2006 (Art. 17°).

Después, el 18 de enero de 2010, la CONAMA inició un segundo proceso de revisión de todas las normas primarias de calidad del aire de gases (SO₂, NO₂, O₃ y CO), mediante la Resolución Exenta N° 35 del mismo organismo, publicada en el Diario Oficial el 19 de marzo de 2010. Antes, la CONAMA realizó un estudio, encargado a la consultora KAS Ambiental, cuyos resultados permitieron realizar un diagnóstico preliminar del estado de cumplimiento de las normas.

Posteriormente, en tres oportunidades, el Ministerio del Medio Ambiente, amplió el plazo para revisar las normas de calidad del aire para gases, según consta en las resoluciones N° 1.090 el 27 de diciembre de 2012, N° 1.696 del 30 de diciembre del 2011 y N° 16 del 19 de octubre del 2010. Durante estos últimos cuatro años, no se registran avances en el expediente público en proceso.

1.2. Objetivo General

El objetivo general del presente estudio es contar con antecedentes y una evaluación técnica, económica y científica que fundamente la revisión de la norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre (SO₂), contenida en el D.S. N°113, del Ministerio de la Secretaría General Presidencia (MINSEGPRES), junto a una evaluación social de los costos y los beneficios de actualizar la norma, considerando al menos tres opciones de escenarios regulatorios.

1.3. Objetivos Específicos

- a) Contar con una recopilación, análisis, y comparación de la evidencia en salud de los efectos al SO₂, de las normas de calidad del aire de SO₂ y de los niveles de emergencia, adoptados o recomendados a nivel internacional.
- b) Contar con una recopilación y síntesis de la evidencia en salud de los efectos de exposición al SO₂, disponible en Chile.

- c) Contar con un completo análisis del comportamiento y tendencia de las concentraciones de SO₂ medidas en la calidad del aire, en zonas industriales priorizadas para tales efectos.
- d) Contar con un completo análisis de la ocurrencia de peaks de SO₂ (horarios o de 5 o 10 minutos), en las zonas industriales priorizadas, y comparar con los valores de estándares internacionales y con los niveles de emergencia ambiental.
- e) Proponer y evaluar por lo menos tres opciones de regulación, considerando para cada escenario una evaluación de los riesgos aceptables, los costos y beneficios sociales. Del mismo modo, se debe contar con una evaluación del beneficio neto de cada escenario para el país y con una evaluación local del efecto de la norma, en las zonas industriales priorizadas.
- f) Proponer y evaluar una modificación de los niveles de emergencia, analizando si es factible, las condiciones que propician la probabilidad de ocurrencia de episodios de contaminación.
- g) Difundir los resultados del estudio a través de la realización de un seminario.

1.4. Caracterización del SO₂

1.4.1. Propiedades físico-químicas del SO₂

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas altamente soluble en agua, no inflamable y estable. Presenta un olor acre picante e irritante a concentraciones superiores a 3 ppm (7860 µg/m³). En presencia de agua (humedad) el SO₂ actúa como un poderoso agente reductor. Es 2,2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera.

A temperatura ambiente el proceso de solubilidad es exotérmico:

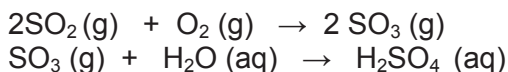


A temperatura ambiente, la solubilidad del SO₂ es aproximadamente 200 g SO₂/L, es decir, 1 mL de agua puede disolver 76 ml SO₂. La solubilidad del SO₂ en agua es altamente dependiente de la temperatura, y es casi 400 veces más soluble a 0°C (228 g/L) que la solubilidad a 90°C (5,8 g/L). El SO₂ disuelto puede ser eliminado totalmente por ebullición.

La reacción del SO₂ con el H₂O produce el ácido sulfuroso H₂SO₃ que sólo existe en solución. La constante de equilibrio es tan pequeña que en el equilibrio, apenas una molécula por billón tiene la forma de ácido sulfuroso:



La mayor parte de la conversión de SO_2 en H_2SO_4 ocurre en las gotas de agua en forma de aerosol, niebla, y nubes suspendidas en la atmósfera, y el resto en la fase gaseosa. La oxidación del SO_2 ocurre en presencia de ozono (O_3) y de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), que aportan el O_2 en la reacción:



Detección: Aunque el dióxido de sulfuro es fácilmente detectado por su distintivo olor, la fatiga olfatoria no se produce rápidamente, y no se debe confiar sólo en el sentido del olfato para la detección. Para la detección del gas SO_2 son más fiables los sensores de gas de dióxido de azufre y monitores que están disponibles comercialmente. La exposición crónica puede resultar en un sentido alterado del olfato (incluida la creciente tolerancia a bajos niveles de dióxido de azufre), una mayor susceptibilidad a infecciones respiratorias, los síntomas de la bronquitis crónica y acelerado deterioro en la función pulmonar.

El SO_2 es capaz de producir daño en materiales de edificación, causando erosión superficial en piedras y concreto de construcción, corrosión y decoloración en metales, y erosión superficial y decoloración en pinturas y recubrimientos orgánicos.

Factor de conversión: Para convertir las unidades de concentración del SO_2 en aire, se usan las siguientes conversiones, asumiendo una temperatura ambiental de 25°C y presión atmosférica normal de 1 atmósfera:

$$\begin{aligned} \text{mg/m}^3 &= \text{ppm} \times (\text{PM} / 24,45) \text{ para el } \text{SO}_2, \text{ el peso molecular } \text{PM} = 64,07 \text{ g/mol} \\ &\text{por lo tanto,} \\ &1 \text{ ppm} = 2,67 \text{ mg/m}^3 \\ \text{y} &1 \text{ mg/m}^3 = 0,37 \text{ ppm} \end{aligned}$$

El factor de conversión entre ppm (volumen/volumen) y $\mu\text{g/m}^3$ es inversamente proporcional a la temperatura absoluta. Diferentes países usan diferentes temperaturas, como p.ej., Australia (NEPM) y WHO 0°C , Europa 20°C , USA 25°C . A 0°C , el factor de conversión es:

$$1 \text{ ppm} = 2618 \mu\text{g/m}^3.$$

La mayoría de las técnicas de muestreo se basan en concentración volumen (ppm) mientras modelos de dispersión a menudo están basadas en flujo de masa desde una fuente y usan $\mu\text{g/m}^3$.

1.4.2. Fuentes y sumideros ambientales de SO_2

Niveles ambientales de SO_2 : Los niveles ambientales detectados y reportados en Chile varían de acuerdo a la zona geográfica, y existencia de fuentes industriales. En Chile las fuentes industriales de SO_2 se sitúan en medio o cercanos a zonas pobladas.

Fuentes: Las principales fuentes de SO_2 son la combustión de combustibles fósiles por plantas generadoras de electricidad y la industria en general. Además contribuyen las fuentes asociadas con el transporte. Los combustibles fósiles principalmente carbón y petróleo, contienen cantidades variables de azufre de acuerdo con su origen, pero típicamente está entre 1% y 5%. Durante la combustión, el azufre en el combustible es convertido casi cuantitativamente en SO_2 o SO_3 . En la actualidad, en los países desarrollados, la mayoría del azufre es removido de los combustibles para motores en el proceso de refinado y de los gases de chimeneas antes de la emisión. Las concentraciones de SO_2 en interiores de habitaciones son, en general, menores que las del exterior, debido a la absorción por las murallas, amoblado, ropas, y sistemas de ventilación.

En el estudio presente se ha puesto énfasis en el SO_2 que se encuentra en el aire en los alrededores de fundiciones de metales (cobre), plantas de generación a combustible fósil, plantas manufactureras de productos de carbón o petróleo, generación, transmisión y distribución de electricidad, fábricas siderúrgicas y fundiciones de hierro, y refinerías de petróleo. Los procesos metalúrgicos liberan cantidades de este gas debido a que se emplean frecuentemente los metales en forma de sulfuros. Actividades portuarias locales y en tránsito también contribuyen con los niveles de SO_2 atmosféricos. Erupciones volcánicas y fuegos al aire abierto son las fuentes naturales más significativas de SO_2 (en el rango de varias a decenas de ppm).

Así, la mayor parte de las emisiones de SO_2 provienen de fuentes puntuales. El SO_2 también se produce en la oxidación fotoquímica de compuestos de S reducidos tales como dimetil sulfuro, sulfuro de hidrógeno, disulfuro de carbono, sulfuro de carbonilo, metil mercaptano, y dimetil disulfuro.

Sumideros: La alta solubilidad del SO_2 en agua permite un intercambio entre el SO_2 atmosférico y el solubilizado en aguas superficiales. Las aguas de los océanos son un reservorio natural del SO_2 atmosférico, sin embargo, el sumidero último para SO_2 es desconocido. Hay información que apoya la idea de reacciones con el suelo, mediante microbios o químico, que pueden remover SO_2 del aire.

La nieve remueve sulfato más eficientemente que el carbón elemental. Dependiendo de las condiciones climáticas, los bosques frondosos pueden retener SO_2 por absorción, en el cual los mecanismos identificados incluyen la cavidad sub-estomatal y las cutículas de las hojas.

Otro mecanismo propuesto es la reacción del O_3 con alquenos atmosféricos (ozonolisis), que producen intermediarios de Criegee¹², que reaccionan con SO_2 para producir SO_3 y finalmente H_2SO_4 .

¹² Radical de Criegee o biradical de Criegee, es un óxido de carbonilo con dos centros que actúan como radicales libres de forma independiente. Estas moléculas contribuyen a degradar el SO_2 y el NO_2 en la atmósfera y podrían controlar el calentamiento global.

El SO_2 puede acumularse en los tejidos de las hojas lo cual causa disturbios en los mecanismos de la fotosíntesis, respiración y transpiración. El SO_2 afecta a las plantas directamente, causando necrosis foliácea (muerte del tejido foliar), además de clorosis, un blanqueamiento o tono amarillento de las hojas verdes.

1.4.3. Usos del dióxido de azufre

El SO_2 existe en el medio ambiente en forma natural y antropogénico y está ampliamente distribuido.

El SO_2 tiene propiedades desinfectantes, razón por la cual se utilizó durante siglos en la desinfección de las cubas de vino quemando azufre en su interior. También se usa en la industria alimenticia como conservante y antioxidante (E220) generalmente de zumos, frutos secos, mermeladas, vino, etc. Es un intermediario en la fabricación del ácido sulfúrico.

El SO_2 se utiliza para fines muy diversos, p.ej., como agente reductor en metalurgia, como frigorífero en la industria del frío, como desinfectante y blanqueador de sustancias alimenticias, como decolorante y fumigante.

En la industria del vino se utiliza extensivamente en la fabricación de vino. Destruye mohos, bacterias y levaduras antes de la introducción de los cultivos de levadura pura necesaria para una buena fermentación. El SO_2 se utiliza también como un medio de esterilización para botellas de vino.

El SO_2 es uno de los pocos conservantes permitidos en la fabricación de jugos de frutas, y licores y jarabes de frutas. Grandes cantidades se utilizan en la industria de zumo de fruta para mejorar el sabor y evitar el deterioro del color de los productos. En la fabricación de azúcar se utiliza dióxido de azufre en grandes cantidades para la refinación y el blanqueo del azúcar.

Se usa en la fumigación de granos donde las existencias de granos y cereales pueden contaminarse con gorgojos, donde la fumigación con SO_2 resulta eficaz. Al mismo tiempo que la infestación es eliminada, se blanquea el grano y así mejora su apariencia.

El SO_2 líquido es utilizado en la refinación del petróleo como un solvente de extracción de productos derivados del petróleo por el proceso de Edeleanau debido a su extracción preferencial de aromáticos, no saturados y compuestos de azufre.

Misceláneo dióxido de azufre tiene aplicación en la fabricación de vidrio; como un inhibidor de la sobretensión en la refinación electrolítica de metales; en la preparación del pegamento y diversas proteínas del alimento tales como proteína del haba de soja, caseína y gelatina

Junto al NO_2 , el SO_2 contribuye a la formación de ácido sulfúrico y nítrico, los que al solubilizarse en las gotas de lluvia en la atmósfera origina la lluvia ácida.