



Informe Final  
Contrato:

“Análisis de Antecedentes y Evaluación Técnica-Económica  
para Revisar la Norma Primaria de Calidad del Aire de  
Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)”

ID N° 608897-40-LE14

Elaborado para:



Ministerio del Medio Ambiente  
Subsecretaría del Medio Ambiente

Santiago, Enero de 2015



## CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE



Universidad de Chile



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE



Universidad de Chile

## Equipo Consultor

Dr. Ítalo Serey  
Director Ejecutivo Fundación CENMA

Sr. Jaime Durán  
Director de Desarrollo Estratégico y Coordinación de Proyectos Fundación CENMA

M. Cs. Carlos Mancilla  
Jefe de Proyecto  
Análisis de Calidad del Aire

Dra. Patricia Matus  
Análisis Epidemiológico

Dr. Julio Salinas  
Análisis Toxicológico

M(e) Maureen Amín  
Análisis Meteorológico y de Calidad del Aire

Sr. Diego Campos  
Análisis Meteorológico y de Calidad del Aire

Ing. Claudio Huepe  
Evaluación Económica y Social

Dra. Nancy Sanhueza  
Evaluación Económica y Social

## RESUMEN EJECUTIVO

### 1.1 Antecedentes Generales

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 contaminantes<sup>1</sup>.

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 Salud<sup>2</sup>, 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 (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas totales en suspensión (PTS).

En particular para el contaminante SO<sub>2</sub>, la Resolución estableció estándares en concentración anual y de 24 horas, cuyos valores fueron de 80 µg/m<sup>3</sup>N y de 365 µg/m<sup>3</sup>N respectivamente. Cabe destacar, que los valores para el SO<sub>2</sub> 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 Minería<sup>3</sup>, se estableció y mantuvo para el SO<sub>2</sub> los mismos valores contenidos en la Resolución N° 1.215. Además, el Decreto incluyó por primera vez tres niveles de emergencia ambiental<sup>4</sup> para concentraciones de una hora para las siguientes situaciones: i) aviso de alerta: 0,75 ppm (1.962 µg/m<sup>3</sup>N); ii) aviso de advertencia: 1,00 ppm (2.616 µg/m<sup>3</sup>N); y iii) aviso de emergencia: 1,5 ppm (3.924 µg/m<sup>3</sup>N). Los niveles de emergencia tienen por objetivo reducir la exposición de la población vulnerable y sensible, de los efectos adversos y agudos del SO<sub>2</sub>.

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 (SO<sub>2</sub>).

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> No publicada en el Diario Oficial.

<sup>3</sup> Publicado el 16 de enero de 1992 en el Diario Oficial.

<sup>4</sup> 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 SO<sub>2</sub>. Para esto, el decreto mantiene el estándar anual que se estableció el año 1978 de 80 µg/m<sup>3</sup>N; redujo el estándar de 24 horas de 365 µg/m<sup>3</sup>N a 250 µg/m<sup>3</sup>N (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°).

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 (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 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.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda no superar concentraciones de SO<sub>2</sub> de 500 µg/m<sup>3</sup> durante un período de 24 horas, debido a que las evidencias indican que: i) personas asmáticas que hacían ejercicio experimentaron cambios en la función pulmonar y en los síntomas respiratorios tras períodos de exposición de apenas 10 minutos, y ii) se observó efectos en la salud de las personas en un intervalo de concentraciones entre 5 y 40 µg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub> durante 24 horas, por lo cual fue imposible obtener un umbral de SO<sub>2</sub> que asegure que no habrá efectos en la salud.

Por lo anterior, la OMS recomienda un enfoque preventivo aceptable de un valor guía de SO<sub>2</sub> de 24 horas de 20 µg/m<sup>3</sup> y de 10 minutos de 500 µg/m<sup>3</sup>. Adicionalmente, recomienda a los países, en términos de políticas de salud y medioambientales, no establecer un estándar de SO<sub>2</sub> anual, debido a: i) es más efectivo focalizar la vigilancia en los efectos agudos del SO<sub>2</sub>; y ii) si se establece y se realiza la vigilancia del nivel de concentración de 24 horas, se garantiza niveles medios anuales bajos<sup>5</sup>.

De esta forma, a partir de la última evidencia científica disponible, las regulaciones internacionales y el valor guía de la OMS, se adaptaron estableciendo concentraciones de SO<sub>2</sub> en intervalos de exposición de 10 minutos y 1 hora.

Estados Unidos por ejemplo, en su última actualización de la norma primaria de SO<sub>2</sub> el año 2010, derogó los valores de las normas de 24 horas y anual; y estableció un valor de concentración de 1 hora de 196 µg/m<sup>3</sup> (75 ppb)<sup>6</sup>. En el caso de la Comunidad Europea, desde el año 2005, recomienda un estándar de 1 hora de 350 µg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>5</sup> Guía de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, 2005.

<sup>6</sup> Part II, 40 CFR Parts 50,53, and 58 Primary National Ambient Air Quality Standard for Sulfur Dioxide; Final Rule, publicado 22.06.2010 [http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/so2/s\\_so2\\_index.html](http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/so2/s_so2_index.html)

Cabe señalar que el estándar de  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $\text{SO}_2$  de 24 horas en Chile, supera en más de 12 veces el valor Guía recomendado por la OMS y el doble del estándar recomendado por la Comunidad Europea<sup>7</sup>.

En el caso de Chile, se ha avanzado con una política ambiental que ha logrado reducir las emisiones de  $\text{SO}_2$  de las principales fuentes o actividades económicas. En efecto, las acciones emprendidas corresponden a: la reducción del contenido de azufre (S) en el diesel, combustible utilizado por el transporte y en algunas fuentes industriales, y el control de las emisiones de  $\text{SO}_2$  de fuentes de generación eléctrica y de las fundiciones de cobre a través de las normas de emisión.

Con el anterior marco jurídico, se podría ahora, aspirar a evaluar la oportunidad de dar un paso en el objetivo de protección de la salud de las personas de los efectos agudos que produce el  $\text{SO}_2$ . En otras palabras, no es suficiente contar con una norma de emisión para limitar el  $\text{SO}_2$  de las fuentes industriales que más aportan y con la mejora del diesel, controlando con esto el aporte de las emisiones del sector transporte. Con tales medidas, no se garantizan que se cumplan los estándares de calidad del aire. Las normas de calidad imponen acciones y objetivos de política focalizados en la vigilancia de los niveles ambientales de  $\text{SO}_2$ , a los que está expuesta la población más vulnerable y sensible.

Se suma a lo anterior, que es un hecho que en el país, hay zonas que compiten entre usos industriales y de asentamiento humano, donde ocurren eventos tóxicos de corta duración que se producen debido a altos niveles de concentración de  $\text{SO}_2$  en períodos de tiempo muy acotados.

## 2.1 Justificación

El Reglamento para la dictación de Normas de calidad ambiental y de emisión, D.S. 38 del año 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, en su Artículo 39, indica que para revisar las normas ambientales se debe considerar criterios de eficacia y de eficiencia en su aplicación, ponderados de acuerdo a:

- a) Los antecedentes considerados para la determinación de la norma de conformidad con lo dispuesto en el artículo 26, 28 inciso 1°, 32 inciso 1° y 37 letra a) del citado Reglamento; que tienen que ver con actualizaciones de los antecedentes que tienen para establecer los estándares.
- b) El nivel de cumplimiento informado por la Superintendencia del Medio Ambiente y vigencia actual de los objetivos tenidos en cuenta al momento de su dictación;

---

<sup>7</sup> Estándares Calidad del Aire para la Comunidad Europea, el estándar para el dióxido de azufre entró en vigencia el 01.01.2005 (<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>).

- c) Los cambios en las condiciones ambientales consideradas al momento de dictarse la norma, y
- d) Los resultados de las investigaciones científicas que aporten antecedentes nuevos sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales o sobre nuevas metodologías de medición.

De esta forma, se puede decir que:

- a) Hay evidencia científica suficiente que indica que los estándares establecidos para el SO<sub>2</sub> de 24 horas y anual, presentan una amplia tolerancia, respecto a las recomendaciones y guías internacionales. En otras palabras, el objetivo preventivo del decreto supremo N°113, no se condice con los niveles que se establecen en los estándares.
- b) Los nuevos antecedentes disponibles desde el 2005, abunda en focalizar la vigilancia sobre los efectos agudos en salud del SO<sub>2</sub>.
- c) Hay evidencia en el país, en zonas industriales que comparten territorio con asentamientos humanos, que la norma de SO<sub>2</sub> no protege a las poblaciones más vulnerables, correspondiente a grupos de asmáticos, infantes y niños.
- d) El decreto supremo N°113, mantiene un estándar anual del año 1978, cuenta con un estándar de 24 horas del año 2003; y no incluye un estándar para la protección de los efectos agudos para exposiciones de una hora o menos.
- e) Los niveles que se establecen para decretar emergencia y que tienen por objeto reducir la exposición de los grupos vulnerables de la población, presentan una amplia tolerancia respecto al riesgo al cual se expone la población.

Por lo expuesto, se requiere contar con antecedentes técnicos y de evaluación social para revisar la norma primaria de calidad del aire de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), establecida en el D.S. N°113, del 2003, del MINSEGRES.

### 3.1 Objetivo General

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 (SO<sub>2</sub>), 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.

### 4.1 Objetivos Específicos

- a) Contar con una recopilación, análisis, y comparación de la evidencia en salud de los efectos al SO<sub>2</sub>, de las normas de calidad del aire de SO<sub>2</sub> y de los niveles de emergencia, adoptados o recomendadas a nivel internacional.
- b) Contar con una recopilación y síntesis de la evidencia en salud de los efectos de exposición al SO<sub>2</sub>, disponible en Chile.
- c) Contar con un completo análisis del comportamiento y tendencia de las concentraciones de SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub> (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.

## Organización del documento

Las características y propiedades físico-químicas del SO<sub>2</sub>, las fuentes y sumideros ambientales, y los usos extendidos de este compuesto químico se describen en sección 1.41.4 En sección 2 se identifican las zonas con presencia de SO<sub>2</sub> en Chile y las estaciones y análisis de calidad de aire, junto con los resultados del análisis meteorológico. Datos sobre evidencia epidemiológica de los efectos del SO<sub>2</sub> en particular la evidencia epidemiológica en Chile, se presentan en sección 3.1.3. En sección 3.2 se muestra la evidencia toxicológica y la evidencia proveniente de estudios clínicos, incluyendo los efectos biológicos de una exposición a corto plazo, como también los efectos del SO<sub>2</sub> en asmáticos. Sustancias con propiedades asmogénicas se discuten brevemente en sección 3.2.1. La toxicidad crónica del SO<sub>2</sub> en humanos se discute también en sección 3.2.1, junto a los mecanismos de acción y las condiciones que predisponen la toxicidad del SO<sub>2</sub>. La sección 4 está dedicada in extenso a la estimación de los riesgos en la salud por SO<sub>2</sub>, la que comienza con una descripción de la estrategia de búsqueda bibliográfica en sección 4.1, con los estudios seleccionados en sección 4.1.1. El desarrollo de los niveles de referencia para el SO<sub>2</sub> se describe en sección 4.2, con una discusión de la metodología seleccionada para el estudio en sección 4.2.3. Las bases científicas para los AEGLs se discuten en sección 5.3.7, y el peso de evidencia para los AEGL-1 y AEGL-2 se muestran en sección 4.2.3, junto al uso y aplicaciones de los AEGLs. Caracterización del riesgo se muestra en sección 5.3.10.

El estudio considera tres aspectos analíticos en la evaluación. El primero corresponde a comparaciones de concentraciones de dióxido de azufre con tres escenarios regulatorios, que incluyen una evaluaciones en resoluciones temporales horarias, diarias y anuales. La sección 5.2 describe en detalle la evaluación de escenarios regulatorios, con las conclusiones en sección 5.2.3. El segundo aspecto corresponde a una evaluación de riesgo en las zonas de estudio. La evaluación de los riesgos a la salud por la exposición al SO<sub>2</sub>. La incertidumbre asociada con la evidencia de SO<sub>2</sub> ambiental es discutida en sección 5.3.11, donde se describe la variabilidad tipo A y la incertidumbre tipo B, seguidos por ejemplos de cada una. El tercer aspecto corresponde a una evaluación económica y social desarrollada en la sección 5.4 en donde se describe la evaluación socioeconómica cualitativa de los beneficios, así como un análisis de actores relevantes y un análisis institucional de las normativas asociadas a la norma primaria de calidad del aire. La integración de los resultados, discusión y conclusiones respecto a la propuesta normativa en sección 6. Diseño de seminario para difundir resultados en sección 7.

# CONTENIDO

<i>RESUMEN EJECUTIVO</i>	<i>iv</i>
1.1 Antecedentes Generales	iv
2.1 Justificación	vi
3.1 Objetivo General	viii
4.1 Objetivos Específicos	viii
<i>Organización del documento</i>	<i>ix</i>
<i>GLOSARIO Y ACRÓNIMOS</i>	<i>xxvii</i>
<b>1. ANTECEDENTES GENERALES</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Caracterización del SO <sub>2</sub>	3
1.4.1. Propiedades físico-químicas del SO <sub>2</sub>	3
1.4.2. Fuentes y sumideros ambientales de SO <sub>2</sub>	4
1.4.3. Usos del dióxido de azufre	6
<b>2. EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA ASOCIADA A SO<sub>2</sub></b>	<b>7</b>
2.1. Generalidades	7
2.2. Metodología	8
2.2.1. Identificación de Zonas Priorizadas	8
2.2.2. Identificación de estaciones de calidad del aire	8
2.2.3. Recopilación y sistematización de la información	10
2.2.4. Análisis de Calidad del Aire	14
2.2.5. Análisis Meteorológico	15
2.3. Resultados	16
2.3.1. Disposición geográfica de las estaciones de calidad del aire	16
2.3.2. Análisis de Calidad del Aire	16
i) TOCOPILLA	17
ii) CALAMA	21
iii) MEJILLONES	25
iv) ANTOFAGASTA – LA NEGRA	31
v) COPIAPÓ – PAIPOTE - TIERRA AMARILLA	37
vi) HUASCO	49
vii) CATEMU – LLAY LLAY	69
viii) QUINTERO - PUCHUNCAVÍ	77

ix) MACHALÍ - COYA	93
x) CORONEL – LOTA – HUALPÉN - TALCAHUANO	101
2.3.3. Análisis estadístico	123
2.3.4. Uso del percentil 99	125
2.3.5. Análisis Meteorológico	128
i) TOCOPILLA. ESTACIÓN E-10 (meteorología y concentraciones)	130
ii) CALAMA. ESTACION SERVICIO MEDICO LEGAL (meteorología y concentraciones)	132
iii) MEJILLONES. ESTACIÓN SUBESTACIÓN ELÉCTRICA (meteorología y concentraciones)	134
iv) a.- ANTOFAGASTA - LA NEGRA. ESTACIÓN SUR (meteorología y concentraciones)	136
iv) b.- ANTOFAGASTA – LA NEGRA. ESTACIÓN COVIEFI (meteorología y concentraciones)	138
v) a.- COIAPÓ – PAIPOTE – TIERRA AMARILLA. ESTACIÓN PAIPOTE (meteorología y concentraciones)	141
v) b.- COIAPÓ – PAIPOTE – TIERRA AMARILLA. ESTACIÓN TIERRA AMARILLA (meteorología y concentraciones)	143
vi) a.- HUASCO. SM1 ESTACIÓN CARRETERA KM 40 (meteorología) y SM9 COMPAÑÍA DE BOMBEROS HUASCO BAJO (concentraciones)	146
vi) b.- HUASCO. ESTACIÓN INTERIOR CENTRAL TERMOELÉCTRICA HUACOLDA (meteorología) y ESCUELA JOSE MIGUEL CARRERA (concentraciones)	148
vii) CATEMU - LLAY LLAY. ESTACIÓN METEOROLÓGICA (meteorología) y SANTA MARGARITA (concentraciones)	151
viii) a.- QUINTERO - PUCHUNCAVÍ. ESTACIÓN LOS MAITENES (meteorología y concentraciones)	153
viii) b.- QUINTERO – PUCHUNCAVÍ. ESTACIÓN GNL QUINTERO (meteorología y concentraciones)	155
ix) MACHALÍ-COYA. ESTACIÓN COYA CLUB (meteorología y concentraciones)	158
x) CORONEL-LOTA-HUALPÉN-TALCAHUANO. ESTACIÓN HUALPÉN (meteorología) y JUNJI (concentraciones)	160
2.4. Conclusiones	162
<b>3. EFECTOS DEL SO<sub>2</sub> EN LA SALUD DE LAS PERSONAS</b>	<b>167</b>
3.1. Epidemiología	167
3.1.1. Resumen	167
3.1.2. Metodología	169
3.1.3. Evidencia epidemiológica en Chile	174
Estudios epidemiológicos sobre el Asma	174
Carga Global de enfermedad atribuible a contaminación por SO <sub>2</sub>	180
3.1.4. Evidencia epidemiológica internacional	183
3.1.5. Discusión	201
3.2. Toxicología	201
3.2.1. Efectos del SO <sub>2</sub> en humanos	201
3.2.2. Discusión	218
<b>4. ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS EN LA SALUD POR SO<sub>2</sub></b>	<b>220</b>
4.1. Metodología de búsqueda bibliográfica	220
4.1.1. Estudios seleccionados	221

4.2.	Desarrollo de niveles de referencia para el SO <sub>2</sub>	230
4.2.1.	Metodología USEPA NAAQS	230
4.2.2.	Metodología World Health Organization	233
4.2.3.	Metodología National Research Council /National Academy of Sciences (NRC/NAS): Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGs)	235
<b>5.</b>	<b>EVALUACIÓN DE ESCENARIOS REGULATORIOS</b>	<b>251</b>
5.1.	Criterios para revisar las normas ambientales	251
5.2.	Evaluación de escenarios normativos	252
5.2.1.	Metodología	252
5.2.2.	Resultados	254
	Situación de superación de niveles de SO <sub>2</sub> , resolución horaria	254
i)	Tocopilla	254
ii)	Calama	256
iii)	Mejillones	258
iv)	Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)	260
v)	Copiapó (Paipote y Tierra Amarilla)	264
vi)	Huasco (Compañía de Bomberos Huasco Bajo y Escuela José Miguel Carrera)	268
vii)	Catemu – Llay Llay	272
viii)	Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL)	274
ix)	Machalí – Coya	278
x)	Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano	280
	Situación de superación de niveles de SO <sub>2</sub> , resolución diaria	282
i)	Tocopilla	282
ii)	Calama	284
iii)	Mejillones	286
iv)	Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)	288
v)	Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Paipote y Tierra Amarilla)	292
vi)	Huasco (SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo y SM9 Escuela José Miguel Carrera)	296
vii)	Catemu – Llay Llay	300
viii)	Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL Quintero)	302
ix)	Machalí – Coya	306
x)	Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano	308
	Situación de superación de niveles de SO <sub>2</sub> , resolución anual	310
i)	Tocopilla	310
ii)	Calama, estación SML	311
iii)	Mejillones	312
iv)	Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)	313
v)	Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Paipote y Tierra Amarilla)	315
vi)	Huasco (SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo y SM9 Escuela JM Carrera)	317
vii)	Catemu – Llay Llay	319
viii)	Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL Quintero)	320
ix)	Machalí – Coya	322
x)	Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano	323
5.2.3.	Conclusiones	324

5.3.	Evaluación de los riesgos a la salud por la exposición al SO <sub>2</sub>	330
5.3.1.	Resumen	330
5.3.2.	Generalidades	333
5.3.3.	Metodología	333
5.3.4.	Caracterización de la exposición	333
	Punto de contacto o punto de exposición entre contaminante y receptor	333
	Ubicación de las estaciones de monitoreo	334
	Concentración representativa de SO <sub>2</sub>	334
5.3.5.	Escenarios de Exposición y Receptores Seleccionados	336
5.3.6.	Niveles de referencia para el SO <sub>2</sub>	338
5.3.7.	Bases científicas para los AEGLs	339
5.3.8.	Dosis de exposición aguda por inhalación de SO <sub>2</sub>	339
5.3.9.	Evaluación de la exposición breve para el SO <sub>2</sub>	341
	Localidad 1: Tocopilla (Estación Escuela E10)	341
	Localidad 2: Calama (Estación SML)	342
	Localidad 3: Mejillones (Estación Sub Estación Eléctrica)	343
	Localidad 4: Antofagasta (Estación Sur)	344
	Localidad 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Paipote)	345
	Localidad 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Tierra Amarilla)	346
	Localidad 6: Huasco (Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo)	347
	Localidad 6: Huasco (Estación Escuela JMC)	348
	Localidad 7: Catemu-Llay Llay (Estación Santa Margarita)	349
	Localidad 8: Quintero-Puchuncaví (Estación Los Maitenes)	350
	Localidad 8: Quinteros-Puchuncaví (Estación GNL Quintero)	351
	Localidad 9: Coya-Machalí (Estación Coya Club)	352
	Localidad 10: Coronel-Lota-Huelpén (Junji)	353
5.3.10.	Caracterización de los riesgos en salud	354
5.3.11.	Evaluación y análisis de la incertidumbre	356
	Bases conceptuales del problema	356
	Variabilidad, estocasticidad, o incertidumbre tipo A	356
	Verdadera incertidumbre o incertidumbre tipo B	356
	Incertidumbre en la información de toxicidad y efectos en la salud	357
	Incertidumbre en la evidencia de las variables	357
	Fuentes de incertidumbre en la estimación de exposición al contaminante	358
	Incertidumbre en los modelos de migración ambiental, exposición y riesgo	358
	Conclusiones del análisis de incertidumbre	358
5.3.12.	Conclusiones de la evaluación de riesgo	359
5.4.	Evaluación económica y social	360
5.4.1.	Introducción: Fundamentos conceptuales del análisis	360
5.4.2.	Antecedentes generales	363
5.4.3.	Análisis de costo - beneficio	374
5.4.4.	Análisis socioeconómico	377
5.4.5.	Conclusiones: Aspectos destacados	381
5.4.6.	Recomendaciones	382
6.	<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b>	<b>384</b>

6.1.	Introducción _____	384
6.2.	Gobernanza y política pública _____	385
6.2.1.	Gobernanza _____	385
6.2.2.	Evaluación de política pública _____	386
6.2.3.	Discusión de Aproximaciones Económicas para los proyectos públicos _____	387
6.2.4.	Limitaciones del Análisis Costo Beneficio _____	388
6.2.5.	Análisis Institucional: Coherencia Normativa _____	390
6.2.6.	Justicia Ambiental _____	391
6.2.7.	Ganancias Ambientales _____	391
6.2.8.	Aproximación Multicriterio para la decisión de escenarios de calidad del Aire _____	392
6.3.	Enfoques normativos para la propuesta de escenarios _____	393
6.3.1.	Resumen de propuestas norma primaria SO <sub>2</sub> considerando criterios y niveles _____	395
6.4.	Niveles de emergencia _____	397
6.4.1.	Resumen de propuestas niveles de emergencia SO <sub>2</sub> _____	398
6.5.	Recomendaciones _____	400
7.	<i>SEMINARIO</i> _____	402
	<i>Anexo 1: Ubicación geográfica de las estaciones de calidad del aire consideradas en el estudio</i> _____	404
	<i>Anexo 2: Estadística descriptiva</i> _____	422
	<i>Anexo 3: Tratamiento de la información</i> _____	446

## Índice de Tablas

Tabla 1. Zonas Priorizadas para el estudio	8
Tabla 2. Estaciones de calidad del aire por zona industrial priorizada	9
Tabla 3. Resolución temporal de los datos entregados por el M.M.A.	10
Tabla 4. Estadística descriptiva estaciones de calidad del aire de Tocopilla (en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	124
Tabla 5. Percentiles para estaciones de calidad del aire de Tocopilla (en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	124
Tabla 6 Percentil 99 para estaciones de calidad del aire consideradas en el estudio	126
Tabla 7. Estimación de la Velocidad del Viento basada en la Escala Beaufort	128
Tabla 8. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación E-10	131
Tabla 9. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Servicio Médico Legal	133
Tabla 10. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Subestación Eléctrica	135
Tabla 11. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Sur	139
Tabla 12. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Coviefj	140
Tabla 13. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Paipote	144
Tabla 14. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Tierra Amarilla	145
Tabla 15. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Km 40 y Segunda Compañía de Bomberos	149
Tabla 16. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Interior Termoeléctrica y Escuela José Miguel Carrera	150
Tabla 17. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Meteorológica y Santa Margarita	152
Tabla 18. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Los Maitenes	156
Tabla 19. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación GNL Quintero	157
Tabla 20. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Coya Club	159
Tabla 21. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Hualpén y Junji	161
Tabla 22 Tendencia de las estaciones por zona en las concentraciones, según análisis de regresión lineal.	162
Tabla 23 Promedio percentil 99 de $\text{SO}_2$ , últimos tres años. Orden descendente.	164
Tabla 24 Tabla resumen de umbrales del viento que favorecen altas concentraciones de $\text{SO}_2$ .	165
Tabla 25. Efectos sobre la salud considerados en la evaluación del beneficio de la regulación del $\text{SO}_2$	168
Tabla 26. Revisiones Sistemáticas sobre los efectos de la contaminación atmosférica por $\text{SO}_2$ , publicaciones PubMed 2014-2004	172
Tabla 27. Prevalencia percibida de Asma, ENS (2009-2010)	177
Tabla 28. Tratamiento del Asma ENS (2009-2010)	179
Tabla 29. Tratamiento del Asma, ENS (2009-2010)	180
Tabla 30. Publicaciones científicas sobre efectos del $\text{SO}_2$ en Chile	181
Tabla 31. Funciones de riesgo del $\text{SO}_2$ utilizadas para el cálculo de los AVISA	182
Tabla 32. Estimación de AVISA atribuible por enfermedades asociadas a la exposición a $\text{SO}_2$	183
Tabla 33. Carga global de Enfermedad atribuible a la exposición a $\text{SO}_2$ , estimación país	183
Tabla 34. Meta – análisis, efectos sobre la salud de la exposición a $\text{SO}_2$	189
Tabla 35. Publicaciones sin hallazgo de efectos por $\text{SO}_2$ , por tipo de efecto estudiado	190
Tabla 36. publicaciones que reportan efectos del $\text{SO}_2$	193

Tabla 37. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios clínicos humanos – 1 a 5 minutos de exposición. _____	222
Tabla 38. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios clínicos humanos – 6 a 10 minutos de exposición. _____	222
Tabla 39. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios clínicos humanos – 11 a 30 minutos de exposición. _____	223
Tabla 40. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios clínicos humanos – 31 minutos a 4 horas de exposición. _____	223
Tabla 41. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios clínicos humanos > 4 horas de exposición. _____	224
Tabla 42. No efectos asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : _____	224
Tabla 43. Efectos respiratorios “positivos” asociados con exposición de corto tiempo al SO <sub>2</sub> : Hallazgos en estudios toxicológicos con animales por sobre 2 horas de exposición. _____	224
Tabla 44. Efectos claves en la salud humana por exposición a peaks en adultos sanos _____	226
Tabla 45. Ejemplo de una estimación de efectos en la salud asociados a SO <sub>2</sub> _____	234
Tabla 46. Concentraciones AEGL para el SO <sub>2</sub> _____	237
Tabla 47. Peso de evidencia para AEGL-1 _____	238
Tabla 48. Resultados seleccionados de exposición a SO <sub>2</sub> en humanos no asmáticos _____	239
Tabla 49. Resultados seleccionados de exposición a SO <sub>2</sub> en humanos asmáticos _____	240
Tabla 50. Guía para exposición aguda de SO <sub>2</sub> (AEGL-2) _____	242
Tabla 51. Peso de evidencia para AEGL-2 _____	242
Tabla 52. Episodios en que los niveles de SO <sub>2</sub> detectados superaron el AEGL-2, medidos por la Red Codelco/Gener _____	246
Tabla 53. Estaciones donde AEGL-1 < SO <sub>2</sub> < AEGL-2 _____	247
Tabla 54. SO <sub>2</sub> Normativa Internacional _____	252
Tabla 55. Escenarios normativos considerados en el estudio _____	253
Tabla 56. Resumen de horas que superan los valores límite propuestos para la norma horaria periodo 2011-2013 _____	325
Tabla 57. Resumen de días que superan los valores límite propuestos para la norma diaria periodo 2011-2013 _____	326
Tabla 58. Promedio anuales de concentraciones de SO <sub>2</sub> por zona y estación, periodo 2011-2013. _____	327
Tabla 59. N° de horas que han superado los umbrales de concentración de SO <sub>2</sub> vigentes para normativa chilena. Periodo 2011 – 2013. _____	328
Tabla 60: Número de veces en que el SO <sub>2</sub> excedió un respectivo AEGL _____	330
Tabla 61: Puntos de contacto identificados para receptores genéricos _____	334
Tabla 62. Concentración de SO <sub>2</sub> en Estaciones de Monitoreo _____	335
Tabla 63: Escenarios de Exposición _____	337
Tabla 64: Análisis de Exposición Aguda Zona 1: Tocopilla (Estación Escuela E10) _____	341
Tabla 65: Análisis de Exposición Aguda Zona 2: Calama (Estación SML) _____	342
Tabla 66: Análisis de Exposición Aguda Zona 3: Mejillones (Estación Sub Estación Eléctrica) _____	343
Tabla 67: Análisis de Exposición Aguda Zona 4: Antofagasta (Estación Sur) _____	344
Tabla 68: Análisis de Exposición Aguda Zona 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Paipote) _____	345
Tabla 69: Análisis de Exposición Aguda Zona 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Tierra Amarilla) _____	346
Tabla 70: Análisis de Exposición Aguda Zona 6: Huasco (Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo) _____	347
Tabla 71: Análisis de Exposición Aguda Zona 6: Huasco (Estación SM9 Escuela JMC) _____	348

<i>Tabla 72: Análisis de Exposición Aguda Zona 7: Catemu-Llay Llay (Estación Santa Margarita)</i>	349
<i>Tabla 73: Análisis de Exposición Aguda Zona 8: Quintero-Puchuncaví (Estación Los Maitenes)</i>	350
<i>Tabla 74: Análisis de Exposición Aguda Zona 8: Quintero-Puchuncaví (Estación GNL Quintero)</i>	351
<i>Tabla 75: Análisis de Exposición Aguda Zona 9: Coya-Machalí (Estación Coya Club)</i>	352
<i>Tabla 76: Análisis de Exposición Aguda Zona 10: Coronel-Lota-Huelpén (Junji)</i>	353
<i>Tabla 77: [SO<sub>2</sub>] que excede el Nivel de Referencia</i>	354
<i>Tabla 78. Instrumentos Regulatorios vigentes para el SO<sub>2</sub>.</i>	363
<i>Tabla 79. Escenarios de normativa para el SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>).</i>	363
<i>Tabla 80. Descripción de Beneficios.</i>	375
<i>Tabla 81. Repartición de costos entre instrumentos normativos.</i>	376
<i>Tabla 82. Costos y beneficios identificados para actores relevantes.</i>	380
<i>Tabla 83. Resumen de la análisis cualitativo de los criterios identificados para la recomendación de un escenario normativo.</i>	393
<i>Tabla 84 Niveles de concentración horaria analizados según criterios</i>	395
<i>Tabla 85 Niveles de concentración diaria analizados según criterios</i>	395
<i>Tabla 86 Niveles de concentración anual analizados según criterios</i>	396
<i>Tabla 87: Propuesta de Formato Seminario</i>	402

## Índice de Figuras

Figura 1. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación escuela E-10, Tocopilla	17
Figura 2. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación escuela E-10, Tocopilla, zoom a 600 µg/m <sup>3</sup> N.	18
Figura 3 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Gobernación, Tocopilla	19
Figura 4. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Gobernación, Tocopilla, zoom a 200 µg/m <sup>3</sup> N.	20
Figura 5. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> Estación Servicio Médico Legal (SML), Calama	21
Figura 6. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Servicio Médico Legal (SML), Calama, zoom a 200 µg/m <sup>3</sup> N.	22
Figura 7. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Hospital del Cobre, Calama	23
Figura 8. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Hospital del Cobre, Calama, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	24
Figura 9. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Ferrocarriles, Mejillones	25
Figura 10. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Ferrocarriles, Mejillones, zoom a 100 µg/m <sup>3</sup> N.	26
Figura 11. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación JJ Latorre, Mejillones	27
Figura 12. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación JJ Latorre, Mejillones, zoom a 100 µg/m <sup>3</sup> N.	28
Figura 13. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Subestación Eléctrica, Mejillones	29
Figura 14. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Subestación Eléctrica, Mejillones, zoom a 100 µg/m <sup>3</sup> N.	30
Figura 15. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Norte, La Negra.	31
Figura 16. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Norte, La Negra, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	32
Figura 17. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Sur, La Negra	33
Figura 18. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Sur, La Negra, zoom a 3000 µg/m <sup>3</sup> N.	34
Figura 19. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coviefi, Antofagasta	35
Figura 20. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coviefi, Antofagasta, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	36
Figura 21. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Copiapó, Copiapó	37
Figura 22. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Copiapó, Copiapó, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	38
Figura 23. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Los Volcanes, Copiapó	39
Figura 24. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Los Volcanes, Copiapó, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	40
Figura 25. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación San Fernando, Paipote	41
Figura 26. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación San Fernando, Paipote, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	42
Figura 27. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Paipote, Paipote	43
Figura 28. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Paipote, Paipote, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	44

Figura 29. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla	45
Figura 30. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	46
Figura 31. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Pabellón, Tierra Amarilla	47
Figura 32. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Pabellón, Tierra Amarilla, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	48
Figura 33. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM1 Vertedero, Huasco	49
Figura 34. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM1 Vertedero, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	50
Figura 35. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM2 Quinta La Rosa , Huasco	51
Figura 36. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM2 Quinta La Rosa , Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	52
Figura 37. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco	53
Figura 38. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	54
Figura 39. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM4 Carretera Km 40, Huasco.	55
Figura 40. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM4 Carretera Km 40, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	56
Figura 41. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM5 Parcela 5 El Pino, Huasco	57
Figura 42. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM5 Parcela 5 El Pino, Huasco zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	58
Figura 43. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM6 Parcela Buena Esperanza, Huasco	59
Figura 44. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM6 Parcela Buena Esperanza, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	60
Figura 45. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM7 Los Loros, Huasco	61
Figura 46. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM7 Los Loros, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	62
Figura 47. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM8 Freirina, Huasco	63
Figura 48. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM8 Freirina, Huasco, zoom a 300 µg/m <sup>3</sup> N.	64
Figura 49. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco	65
Figura 50. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	66
Figura 51. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM10 Compañía de Bomberos EME, Huasco	67
Figura 52. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación SM10 Compañía de Bomberos EME, Huasco, zoom a 400 µg/m <sup>3</sup> N.	68
Figura 53 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lo Campo, Catemu – Llay Llay.	69
Figura 54 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lo Campo, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	70
Figura 55 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay.	71

Figura 56 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	72
Figura 57 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Catemu, Catemu – Llay Llay.	73
Figura 58 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Catemu, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	74
Figura 59 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Romeral, Catemu – Llay Llay.	75
Figura 60 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Romeral, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	76
Figura 61 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación La Greda, Quintero – Puchuncaví.	77
Figura 62 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación La Greda, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	78
Figura 63 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Los Maitenes, Quintero – Puchuncaví.	79
Figura 64 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Los Maitenes, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	80
Figura 65 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Puchuncaví, Quintero – Puchuncaví.	81
Figura 66 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Puchuncaví, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	82
Figura 67 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Sur, Quintero – Puchuncaví.	83
Figura 68 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Sur, Quintero – Puchuncaví, zoom a 3000 µg/m <sup>3</sup> N.	84
Figura 69 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Valle Alegre, Quintero – Puchuncaví.	85
Figura 70 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Valle Alegre, Quintero – Puchuncaví, zoom a 1500 µg/m <sup>3</sup> N.	86
Figura 71 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví.	87
Figura 72 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví, zoom a 1500 µg/m <sup>3</sup> N.	88
Figura 73 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Quintero, Quintero – Puchuncaví.	89
Figura 74 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví, zoom a 3000 µg/m <sup>3</sup> N.	90
Figura 75 . Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación GNL Quintero, Quintero – Puchuncaví.	91
Figura 76 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación GNL Quintero, Quintero – Puchuncaví, zoom a 4000 µg/m <sup>3</sup> N.	92
Figura 77 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coya Club, Machalí – Coya.	93
Figura 78 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coya Club, Machalí - Coya, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	94
Figura 79 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coya Población, Machalí – Coya.	95
Figura 80 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coya Población, Machalí – Coya, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	96
Figura 81 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cauquenes, Machalí – Coya.	97

Figura 82 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cauquenes, Machalí – Coya, zoom a 2000 µg/m <sup>3</sup> N.	98
Figura 83 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cipreses, Machalí – Coya.	99
Figura 84 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cipreses, Machalí – Coya, zoom a 1000 µg/m <sup>3</sup> N.	100
Figura 85 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación CAP, Talcahuano.	101
Figura 86 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación CAP, Talcahuano, zoom a 200 µg/m <sup>3</sup> N.	102
Figura 87 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Inpesca, Talcahuano.	103
Figura 88 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Inpesca, Talcahuano, zoom a 250 µg/m <sup>3</sup> N.	104
Figura 89 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Indura, Talcahuano.	105
Figura 90 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Indura, Talcahuano, zoom a 200 µg/m <sup>3</sup> N.	106
Figura 91 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Junji, Hualpén.	107
Figura 92 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Junji, Hualpén, zoom a 250 µg/m <sup>3</sup> N.	108
Figura 93 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Price, Hualpén.	109
Figura 94 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Price, Hualpén, zoom a 200 µg/m <sup>3</sup> N.	110
Figura 95 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lagunillas, Coronel.	111
Figura 96 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lagunillas, Coronel, zoom a 150 µg/m <sup>3</sup> N.	112
Figura 97 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coronel Norte, Coronel.	113
Figura 98 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coronel Norte, Coronel, zoom a 250 µg/m <sup>3</sup> N.	114
Figura 99 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cerro Merquín, Coronel.	115
Figura 100 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Cerro Merquín, Coronel, zoom a 150 µg/m <sup>3</sup> N.	116
Figura 101 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coronel Sur, Coronel.	117
Figura 102 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Coronel Sur, Coronel, zoom a 150 µg/m <sup>3</sup> N.	118
Figura 103 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lota Urbana, Lota.	119
Figura 104 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lota Urbana, Lota, zoom a 150 µg/m <sup>3</sup> N.	120
Figura 105 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lota Rural, Lota.	121
Figura 106 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO <sub>2</sub> . Estación Lota Rural, Lota, zoom a 250 µg/m <sup>3</sup> N.	122
Figura 107. Análisis meteorológico, Tocopilla, estación Escuela E-10, 2011-2013	130
Figura 108. Análisis meteorológico, zona Calama, estación Servicio Médico Legal, 2012-2013	132
Figura 109. Análisis meteorológico, zona Mejillones, estación Subestación Eléctrica, 2011-2013	134
Figura 110. Análisis meteorológico, zona Antofagasta-La Negra, estación Sur, 2011-2013	136
Figura 111. Análisis meteorológico, zona Antofagasta-La Negra, estación Coviefi, 2011-2013	138
Figura 112. Análisis meteorológico, zona Paipote, estación Paipote, 2011-2013	141
Figura 113. Análisis meteorológico, zona Paipote, estación Tierra Amarilla, 2011-2013	143
Figura 114. Análisis meteorológico, zona Huasco, estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo, 2011-2013	146

<i>Figura 115. Análisis meteorológico, zona Huasco, estación Escuela JMC, 2011-2013</i>	148
<i>Figura 116. Análisis meteorológico, zona Catemu-Llay Llay, estación Santa Margarita, 2011-2013</i>	151
<i>Figura 117. Análisis meteorológico, zona Quintero-Puchuncaví, estación Los Maitenes, 2011-2013</i>	153
<i>Figura 118. Análisis meteorológico, zona Quintero-Puchuncaví, estación GNL Quintero, 2011-2013</i>	155
<i>Figura 119. Análisis meteorológico, zona Machalí-Coya, estación Coya Club, 2011-2013</i>	158
<i>Figura 120. Análisis meteorológico, zona Coronel-Lota-Hualpén-Talcahuano estación Junji, 2011-2013</i>	160
<i>Figura 121. N° de eventos hospitalarios por asma, Chile 2001-2011.</i>	176
<i>Figura 122. Edad de diagnóstico del Asma, Chile, ENS (2009-2010)</i>	178
<i>Figura 123. Porcentaje de resultados con asociación entre exposición a SO<sub>2</sub> y distintos efectos sobre la salud (N° total de publicaciones: 43). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.</i>	184
<i>Figura 124. Tipo de efecto estudiado (N° total de publicaciones: 143). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.</i>	185
<i>Figura 125. Resultados de la concordancia en la asociación entre exposición a SO<sub>2</sub> y distintos tipos de efectos (%). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.</i>	186
<i>Figura 126. Tipo de efectos significativos reportados por 106 publicaciones (2004-2014. Fuente: elaboración propia a partir de revisión sistemática PubMed</i>	187
<i>Figura 127. Mortalidad asociada positivamente a la exposición a SO<sub>2</sub> (N = 21 estudios). Fuente: elaboración propia a partir de revisión sistemática PubMed</i>	187
<i>Figura 128. Ejemplo de una estimación de efectos en la salud asociados con SO<sub>2</sub> y para una ciudad hipotética usando la metodología Toolbox 10.</i>	234
<i>Figura 129. Ejemplo de valores horarios de SO<sub>2</sub>, entre el 23 y 25 de mayo de 2011</i>	245
<i>Figura 130. Ejemplo de valores horarios de SO<sub>2</sub>, entre el 6 y 8 junio de 2011</i>	245
<i>Figura 131. Representación de los cocientes de riesgo para receptores expuestos a tres concentraciones de SO<sub>2</sub> en aire. Un AEGL-1 <math>\leq 0,52 \text{ mg/m}^3</math> es un supuesto nivel inocuo de exposición y para una exposición de 10 minutos corresponde a un cociente de riesgo <math>\text{CR} \leq 1</math>. Mientras la exposición ocurra a niveles de SO<sub>2</sub> <math>\text{AEGL} \leq 0,52 \text{ mg/m}^3</math>, el riesgo no va a sobrepasar el <math>\text{CR} \leq 1</math>.</i>	250
<i>Figura 132. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla</i>	254
<i>Figura 133. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Escuela E-10, Tocopilla</i>	255
<i>Figura 134. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama</i>	256
<i>Figura 135. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación SML, Calama</i>	257
<i>Figura 136. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones</i>	258
<i>Figura 137. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Subestación Eléctrica, Mejillones</i>	259
<i>Figura 138. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, Antofagasta – La Negra</i>	260
<i>Figura 139. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Sur, Antofagasta - La Negra</i>	261
<i>Figura 140. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta – La Negra</i>	262
<i>Figura 141. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Coviefi, Antofagasta - La Negra</i>	263
<i>Figura 142. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Copiapó</i>	264
<i>Figura 143. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Paipote, Copiapó</i>	265

<i>Figura 144. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Copiapó</i>	266
<i>Figura 145. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Tierra Amarilla, Copiapó</i>	267
<i>Figura 146. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco</i>	268
<i>Figura 147. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación SM9 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco</i>	269
<i>Figura 148. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela J.M. Carrera, Huasco</i>	270
<i>Figura 149. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Escuela J.M. Carrera, Huasco</i>	271
<i>Figura 150. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay</i>	272
<i>Figura 151. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay</i>	273
<i>Figura 152. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví</i>	274
<i>Figura 153. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví</i>	275
<i>Figura 154. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví</i>	276
<i>Figura 155. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví</i>	277
<i>Figura 156. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí - Coya</i>	278
<i>Figura 157. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Coya Club, Machalí - Coya</i>	279
<i>Figura 158. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano</i>	280
<i>Figura 159. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Junji, Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano</i>	281
<i>Figura 160. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla</i>	282
<i>Figura 161. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Escuela E-10, Tocopilla</i>	283
<i>Figura 162. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama</i>	284
<i>Figura 163. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SML, Calama</i>	285
<i>Figura 164. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones</i>	286
<i>Figura 165. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Subestación Eléctrica, Mejillones</i>	287
<i>Figura 166. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, Antofagasta – La Negra</i>	288
<i>Figura 167. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Sur, Antofagasta – La Negra</i>	289
<i>Figura 168. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta – La Negra</i>	290

<i>Figura 169. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Coviefi, Antofagasta – La Negra</i>	291
<i>Figura 170. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Copiapó</i>	292
<i>Figura 171. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Paipote, Copiapó</i>	293
<i>Figura 172. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Copiapó</i>	294
<i>Figura 173. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Tierra Amarilla, Copiapó</i>	295
<i>Figura 174. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco</i>	296
<i>Figura 175. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco</i>	297
<i>Figura 176. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SM9 Escuela J.M. Carrera, Huasco</i>	298
<i>Figura 177. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SM9 Escuela J. M. Carrera, Huasco</i>	299
<i>Figura 178. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay</i>	300
<i>Figura 179. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay</i>	301
<i>Figura 180. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví</i>	302
<i>Figura 181. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví</i>	303
<i>Figura 182. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví</i>	304
<i>Figura 183. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví</i>	305
<i>Figura 184. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí Coya</i>	306
<i>Figura 185. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Coya Club, Machalí - Coya</i>	307
<i>Figura 186. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Hualpén</i>	308
<i>Figura 187. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación junji, Hualpén</i>	309
<i>Figura 188. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla</i>	310
<i>Figura 189. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama</i>	311
<i>Figura 190. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones</i>	312
<i>Figura 191. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, La Negra</i>	313
<i>Figura 192. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta</i>	314
<i>Figura 193. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Paipote</i>	315
<i>Figura 194. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla</i>	316
<i>Figura 195. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco</i>	317
<i>Figura 196. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco</i>	318

<i>Figura 197. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay</i>	319
<i>Figura 198. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví</i>	320
<i>Figura 199. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví</i>	321
<i>Figura 200. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí - Coya</i>	322
<i>Figura 201. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Hualpén</i>	323
<i>Figura 202. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Escuela E10</i>	341
<i>Figura 203. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación SML</i>	342
<i>Figura 204. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Sub Estación Eléctrica</i>	343
<i>Figura 205. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Sur</i>	344
<i>Figura 206. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Paipote</i>	345
<i>Figura 207. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Tierra Amarilla</i>	346
<i>Figura 208. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación SM3 Cia. Bomberos</i>	347
<i>Figura 209. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación SM9 Escuela JMC</i>	348
<i>Figura 210. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Santa Margarita</i>	349
<i>Figura 211. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Los Maitenes</i>	350
<i>Figura 212. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación GNL Quintero</i>	351
<i>Figura 213. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Coya</i>	352
<i>Figura 214. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Junji</i>	353
<i>Figura 215. [SO<sub>2</sub>] que Excede el Nivel de Referencia</i>	355
<i>Figura 216. Promedio anual de incidencias de Urgencias Respiratorias (2010 al 2013). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	365
<i>Figura 217. Riesgo de cuadro respiratorio agudo respecto del promedio del país. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	366
<i>Figura 218. Comparación de incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en niños de 1 a 14 años. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	367
<i>Figura 219. Incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en adultos de 15 a 64 años. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	368
<i>Figura 220. Comparación de incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en adultos mayores de 65 años o más. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	369
<i>Figura 221. Hospitalizaciones por Asma por cada 100.000 habitantes para hombres y mujeres. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	370
<i>Figura 222. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma por cada 100 mil habitantes para cada grupo etario (niños, adultos y adultos mayores). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	371
<i>Figura 223. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma para cada grupo etario (hombres). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	372
<i>Figura 224. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma para cada grupo etario (mujeres). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis (www.deis.cl), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.</i>	373
<i>Figura 225. Actores Impactados por la normativa.</i>	378

<i>Figura 226. Figura en que se observan los ocho aspectos fundamentales de la buena gobernanza según Crabbe &amp; Leroy, 2008 (UNESCAP, 2008).</i>	385
<i>Figura 227. Triángulo de criterios jurídicos económicos y políticos para políticas públicas.</i>	387
<i>Figura 228. Muestra la relación de la norma primaria de SO<sub>2</sub> respecto a las otras normas que reducen concentraciones de SO<sub>2</sub>.</i>	390
<i>Figura 229. Niveles de Exposición aguda y significado (AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3)</i>	398
<i>Figura 230. Niveles de Emergencia</i>	399
<i>Figura 231 Estaciones de calidad del aire consideradas en Tocopilla.</i>	405
<i>Figura 232 Estaciones de calidad del aire consideradas en Calama.</i>	406
<i>Figura 233 Estaciones de calidad del aire consideradas en Mejillones.</i>	407
<i>Figura 234 Estaciones de calidad del aire consideradas en Antofagasta.</i>	408
<i>Figura 235 Estaciones de calidad del aire consideradas en La Negra.</i>	409
<i>Figura 236 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla.</i>	410
<i>Figura 237 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Copiapó – Paipote).</i>	411
<i>Figura 238 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Tierra Amarilla).</i>	412
<i>Figura 239 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Estación Pabellón).</i>	413
<i>Figura 240 Estaciones de calidad del aire consideradas en Huasco.</i>	414
<i>Figura 241 Estaciones de calidad del aire consideradas en Catemu – Llay Llay.</i>	415
<i>Figura 242 Estaciones de calidad del aire consideradas en Quintero – Puchuncaví.</i>	416
<i>Figura 243 Estaciones de calidad del aire consideradas en Machalí – Coya.</i>	417
<i>Figura 244 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano.</i>	418
<i>Figura 245 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Hualpén – Talcahuano).</i>	419
<i>Figura 246 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Coronel).</i>	420
<i>Figura 247 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Lota).</i>	421

## GLOSARIO Y ACRÓNIMOS

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	microgramos por metro cúbico
AERMOD	AMS/EPA Regulatory Model (steady-state plume model) (Modelo de dispersión atmosférica)
AHR	airways hyper responsiveness (hiperreactividad vías respiratorias)
AM	alveolar macrophages (macrófagos alveolares)
AST	aspartate-amino-transferase
CALPUFF	Advanced non-steady-state meteorological and air quality modeling system used by the EPA for assessing long range transport of pollutants. (Sistema de modelización meteorológica y calidad del aire utilizado por la EPA para evaluar el transporte de los contaminantes).
EC	European Community (Comunidad Europea)
ED	Emergency department (Departamento de Emergencia)
EPOC	Enfermedades pulmonares obstructivas crónicas
CI	intervalo de confianza
COPD	chronic obstructive pulmonary disease (enfermedad pulmonar obstructiva crónica)
FEV1	forced expiratory volume in 1 second (volumen expiratorio forzada)
FVC	forced vital capacity (capacidad vital forzada)
GSD	geometric standard deviation (desviación estándar geométrica)
h	hour (hora)
IARC	International Agency for Research on Cancer (WHO) (Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer OMS)
ISC3	steady-state Gaussian plume dispersion model used to assess pollutant concentrations from industrial sources (modelo de dispersión gaussiano para evaluar las concentraciones de contaminantes de fuentes industriales)
LC0.01	lethal concentration at which 0.01% of exposed animals die (dosis letal a la cual mueren 0.01% de los animales expuestos)
LD50	dosis letal a la cual mueren 50% de los animales expuestos
LOD	limit of detection (límite de detección)
LOEL	lowest-observed-effect level (nivel más bajo de efectos observados)
LRS	lower respiratory symptoms (síntomas respiratorios bajos)
min	minute (minute)
N, n	number of observations (número de observaciones)
NAS	National Academy of Sciences (Academia Nacional de Ciencias)
NOAEL	no-observed-adverse-effect level (nivel de efectos adversos no observados)
NOEL	no-observed-effect level (nivel de efecto no observado)
NRC	National Research Council (Consejo Nacional de Investigación)
NTP	National Toxicology Program (Programa Nacional de Toxicología)
P5	5th percentile (percentil 5)
P95	95th percentile (percentile 95)
PBEM	population based exposure model (s) (modelo de exposición basado en la población)
PD100	provocative dose that produces a 100% increase in sRAW (dosis que produce un aumento del 100% en sRAW)
PD20	provocative dose that produces a 20% decrease in FEV1 (dosis que produce una disminución del 20% en FEV1)

PD20FEV1	20% decrease in forced expiratory volume in 1 second (disminución del 20% en el volumen expiratorio forzado en 1 segundo)
PEF	peak expiratory flow (flujo expiratorio máximo)
PM	particulate matter (material particulado)
PM10	particulate matter with a 50% upper cut point at 10 $\mu\text{m}$ aerodynamic diameter and a collection efficiency curve (material particulado inferior a 10 $\mu$ )
PM2.5	particulate matter with a 50% upper cut point at 2.5 $\mu\text{m}$ aerodynamic diameter and a collection efficiency curve; surrogate for fine PM (material particulado fino inferior a 2.5 $\mu$ )
PM10-2.5	particulate matter with a 50% upper cut point at 10 $\mu\text{m}$ aerodynamic diameter, a 50% lower cut point at 2.5 $\mu\text{m}$ aerodynamic diameter, and collection efficiency curves identical to those for PM10 and PM2.5; surrogate for thoracic coarse PM (does not include fine PM) (material particulado fracción 10 a 2.5 $\mu$ )
pNEM	probabilistic National Exposure Model (Modelo probabilístico Nacional de Exposición)
ppb	parts per billion (partes por billón)
ppbv	parts per billion by volume (partes por billón en volumen)
ppm	parts per million (partes por millón)
pSO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	particulate sulfate (sulfato en partículas)
Raw	airway resistance (Resistencia de la vía aérea)
RH	relative humidity (humedad relativa)
RMR	resting metabolic rate (metabolismo en reposo)
SDRVR	Síndrome de Disfunción Reactiva de las Vías Respiratorias (del inglés <i>Reactive Airway Dysfunction Syndrome, RADS</i> )
SO <sub>2</sub>	sulfur dioxide (dióxido de azufre)
SO <sub>3</sub>	sulfur trioxide (trióxido de azufre)
SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	sulfite ion (ion sulfito)
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	sulfate ion (ion sulfato)
SOB	shortness of breath (disnea)
SO <sub>x</sub>	sulfur oxides (óxido de azufre)
SPM	suspended particulate matter (material particulado en suspensión)
sRaw	specific airway resistance (resistencia vía aérea específica)
T, t	time; duration of exposure (tiempo; duración de exposición)
TSP	total suspended particles (partículas totales en suspensión)
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental EEUU)
V <sup>°</sup> E	minute ventilation (ventilación por minuto)
Vd	deposition rate (tasa de depositación)
WHO	World Health Organization (Organización Mundial de la Salud)
wt %	percent by weight (porcentaje por peso)
EEUU GAO	Contraloría General de EE.UU.
RETCS	Registro de Efectos Tóxicos de Sustancias Químicas, en la actualidad es mantenido por Elsevier MDL.
PAHs	Hidrocarburos poliaromáticos
DNA	término en inglés del ácido desoxirribonucleico (ADN)

# 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 contaminantes<sup>8</sup>.

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 Salud<sup>9</sup>, 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 (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas totales en suspensión (PTS).

En particular para el contaminante SO<sub>2</sub>, la Resolución estableció estándares en concentración anual y de 24 horas, cuyos valores fueron de 80 µg/m<sup>3</sup>N y de 365 µg/m<sup>3</sup>N respectivamente. Cabe destacar, que los valores para el SO<sub>2</sub> 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 Minería<sup>10</sup>, se estableció y mantuvo para el SO<sub>2</sub> los mismos valores contenidos en la Resolución N° 1.215. Además, el Decreto incluyó por primera vez tres niveles de emergencia ambiental<sup>11</sup> para concentraciones de una hora para las siguientes situaciones: i) aviso de alerta: 0,75 ppm (1.962 µg/m<sup>3</sup>N); ii) aviso de advertencia: 1,00 ppm (2.616 µg/m<sup>3</sup>N); y iii) aviso de emergencia: 1,5 ppm (3.924 µg/m<sup>3</sup>N). Los niveles de emergencia tienen por objetivo reducir la exposición de la población vulnerable y sensible, de los efectos adversos y agudos del SO<sub>2</sub>.

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 (SO<sub>2</sub>).

---

<sup>8</sup> 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.

<sup>9</sup> No publicada en el Diario Oficial.

<sup>10</sup> Publicado el 16 de enero de 1992 en el Diario Oficial.

<sup>11</sup> 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 SO<sub>2</sub>. Para esto, el decreto mantiene el estándar anual que se estableció el año 1978 de 80 µg/m<sup>3</sup>N; redujo el estándar de 24 horas de 365 µg/m<sup>3</sup>N a 250 µg/m<sup>3</sup>N (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 SO<sub>2</sub> 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 (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 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 (SO<sub>2</sub>), 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 SO<sub>2</sub>, de las normas de calidad del aire de SO<sub>2</sub> y de los niveles de emergencia, adoptados o recomendadas a nivel internacional.
- b) Contar con una recopilación y síntesis de la evidencia en salud de los efectos de exposición al SO<sub>2</sub>, disponible en Chile.

- c) Contar con un completo análisis del comportamiento y tendencia de las concentraciones de SO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub> (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 SO<sub>2</sub>

### 1.4.1. Propiedades físico-químicas del SO<sub>2</sub>

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) 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/m<sup>3</sup>). En presencia de agua (humedad) el SO<sub>2</sub> 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:

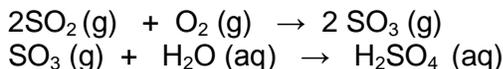


A temperatura ambiente, la solubilidad del SO<sub>2</sub> es aproximadamente 200 g SO<sub>2</sub>/L, es decir, 1 mL de agua puede disolver 76 ml SO<sub>2</sub>. La solubilidad del SO<sub>2</sub> en agua es altamente dependiente de la temperatura, y es casi 400 veces más soluble a 0°C (228 g/L) que la solubilidad a 90°C (5,8 g/L). El SO<sub>2</sub> disuelto puede ser eliminado totalmente por ebullición.

La reacción del SO<sub>2</sub> con el H<sub>2</sub>O produce el ácido sulfuroso H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> 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  $\text{SO}_2$  en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  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  $\text{SO}_2$  ocurre en presencia de ozono ( $\text{O}_3$ ) y de peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), que aportan el  $\text{O}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  en aire, se usan las siguientes conversiones, asumiendo una temperatura ambiental de  $25^\circ\text{C}$  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  $0^\circ\text{C}$ , Europa  $20^\circ\text{C}$ , USA  $25^\circ\text{C}$ . A  $0^\circ\text{C}$ , 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 $\text{SO}_2$

**Niveles ambientales de  $\text{SO}_2$ :** 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  $\text{SO}_2$  se sitúan en medio o cercanos a zonas pobladas.

**Fuentes:** Las principales fuentes de  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  o  $\text{SO}_3$ . 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  atmosféricos. Erupciones volcánicas y fuegos al aire abierto son las fuentes naturales más significativas de  $\text{SO}_2$  (en el rango de varias a decenas de ppm).

Así, la mayor parte de las emisiones de  $\text{SO}_2$  provienen de fuentes puntuales. El  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  en agua permite un intercambio entre el  $\text{SO}_2$  atmosférico y el solubilizado en aguas superficiales. Las aguas de los océanos son un reservorio natural del  $\text{SO}_2$  atmosférico, sin embargo, el sumidero último para  $\text{SO}_2$  es desconocido. Hay información que apoya la idea de reacciones con el suelo, mediante microbios o químico, que pueden remover  $\text{SO}_2$  del aire.

La nieve remueve sulfato más eficientemente que el carbón elemental. Dependiendo de las condiciones climáticas, los bosques frondosos pueden retener  $\text{SO}_2$  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  $\text{O}_3$  con alquenos atmosféricos (ozonolisis), que producen intermediarios de Criegee<sup>12</sup>, que reaccionan con  $\text{SO}_2$  para producir  $\text{SO}_3$  y finalmente  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

---

<sup>12</sup> 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  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_2$  en la atmósfera y podrían controlar el calentamiento global.

El  $\text{SO}_2$  puede acumularse en los tejidos de las hojas lo cual causa disturbios en los mecanismos de la fotosíntesis, respiración y transpiración. El  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  existe en el medio ambiente en forma natural y antropogénico y está ampliamente distribuido.

El  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  se utiliza también como un medio de esterilización para botellas de vino.

El  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  resulta eficaz. Al mismo tiempo que la infestación es eliminada, se blanquea el grano y así mejora su apariencia.

El  $\text{SO}_2$  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  $\text{NO}_2$ , el  $\text{SO}_2$  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.

## 2. EVALUACIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y METEOROLOGÍA ASOCIADA A SO<sub>2</sub>

### 2.1. Generalidades

Este capítulo considera una evaluación de la calidad del aire en diez zonas de Chile con presencia de importantes asentamientos industriales que emiten SO<sub>2</sub> al aire. El análisis consideró una primera etapa de identificación de estaciones de calidad del aire del estudio. Posterior a ello se procedió a la recopilación, orden y validación de datos de concentración de SO<sub>2</sub> y meteorología. Con las bases de datos obtenidas se realizó un análisis del comportamiento histórico, tendencias, estadística descriptiva y análisis meteorológico de las zonas del estudio.

Los resultados de calidad del aire muestran que el comportamiento del SO<sub>2</sub> es irregular en el tiempo y en el espacio, con tendencia a disminuir durante los últimos años.

Con la estadística descriptiva se obtiene información clara y explícita de la situación de cada zona incorporada en el estudio a modo de obtener antecedentes que apoyen la correcta toma de decisiones en torno a la revisión de la norma primaria de calidad del aire para SO<sub>2</sub>.

Por su parte, el promedio del percentil 99 de los tres últimos años es un buen indicador del estado de la calidad del aire asociado al dióxido de azufre. Desde esta perspectiva, al ordenar las zonas en forma descendente se obtiene:

- Antofagasta – La Negra
- Quintero – Puchuncaví
- Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla
- Tocopilla
- Catemu – Llay Llay
- Machalí Coya
- Huasco
- Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano
- Mejillones
- Calama

Del análisis meteorológico se concluye que el viento es un factor importante en el transporte de SO<sub>2</sub>. En todas las zonas se encuentra una relación entre la velocidad y la dirección, las mayores concentraciones se favorecen a una cierta dirección y a un cierto umbral de viento.

## 2.2. Metodología

### 2.2.1. Identificación de Zonas Priorizadas

Para realizar el análisis del comportamiento y tendencia de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, el Ministerio del Medio Ambiente priorizó zonas con presencia de importantes núcleos industriales que son fuentes emisoras de este contaminante (principalmente termoeléctricas y fundiciones). Las zonas consideradas son las siguientes (Tabla 1):

**Tabla 1. Zonas Priorizadas para el estudio**

N°	Zona Industrial Priorizada	Región	Principales fuentes emisoras de SO <sub>2</sub>
1	Tocopilla	Antofagasta	Termoeléctricas
2	Calama	Antofagasta	Fundición Chuquicamata Ministro Hales
3	Mejillones	Antofagasta	Termoeléctricas Planta de ácidos Otras
4	Antofagasta – La Negra	Antofagasta	Fundición Alto Norte
5	Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla	Atacama	Fundición Hernán Videla Lira (HVL)
6	Huasco	Atacama	Termoeléctricas CAP pellets de Fe
7	Catemu – Llay Llay	Valparaíso	Fundición Chagres
8	Quintero – Puchuncaví	Valparaíso	Termoeléctrica AES Gener Fundición Codelco Ventanas
9	Machalí – Coya	O'Higgins	Fundición Caletones
10	Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano	Biobío	Termoeléctricas Procesos calderas Siderurgia

### 2.2.2. Identificación de estaciones de calidad del aire

Para cada una de las zonas priorizadas, el Ministerio del Medio Ambiente dispuso de datos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Las estaciones de calidad del aire consideradas para el estudio son las que se indican a continuación:

**Tabla 2. Estaciones de calidad del aire por zona industrial priorizada**

Zona Industrial Priorizada	Nombre de la Estación	Coordenada UTM	
		Este	Norte
Tocopilla	E10	377358	7557236
	Gobernación	376085	7556381
Calama	Hospital	509427	7517292
	SML	505383	7516195
Mejillones	Ferrocarril	349999	7444553
	JJ Latorre	352288	7444142
	Sub. Eléctrica	354718	7445218
Antofagasta - La Negra	Coviefi	356847	7379757
	Norte	365988	7368263
	Sur	366690	7363604
Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla	Copiapó	368470	6972981
	Los Volcanes	371047	6971867
	Pabellón	378151	6940115
	Paipote	374539	6967442
	San Fernando	371592	6969334
	Tierra Amarilla	375128	6960567
Huasco	SM1 - Vertedero	279550	6845667
	SM2 - Quinta La Rosa	286435	6849423
	SM3 - Compañía de Bomberos Huasco Bajo	286776	6848660
	SM4 - Carretera Km 40	287855	6847632
	SM5 - Parcela 5 El Pino	289929	6847331
	SM6 - Parcela Buena Esperanza	291898	6845241
	SM7 - Los Loros	294851	6845909
	SM8 - Freirina	296311	6844887
	SM9 - Escuela JM Carrera	282754	6848697
	SM10 - Cuerpo de Bomberos EME	282486	6849125
Catemu - Llay Llay	Catemu	316512	6371481
	Sta. Margarita	318469	6371812
	Lo Campo	322275	6369529
	Romeral	312181	6366428
Quintero - Puchuncaví	La Greda	268134	6373885
	Puchuncaví	274320	6377318
	Sur	267596	6367993
	Valle Alegre	271835	6367385

Zona Industrial Priorizada	Nombre de la Estación	Coordenada UTM	
	Los Maitenes	270018	6372133
	Quintero	263273	6369387
	Ventanas	267534	6374612
	GNL Quintero	262847	6369407
Machalí - Coya	Coya Club	357944	6214431
	Coya Población	359047	6214212
	Cauquenes	356722	6209574
	Cipreses	365276	6207829
Coronel - Lota - Hualpén - Talcahuano	CAP	667962	5932742
	Inpesca	669249	5932589
	Indura	668347	5928987
	Junji	668152	5927795
	Price	667819	5926622
	Coronel Norte	664773	5902542
	Coronel Sur	665556	5899980
	Lagunillas	663786	5905329
	Cerro Merquín	664618	5901181
	Lota Urbana	664855	5895289
	Lota Rural	664203	5892415

### 2.2.3. Recopilación y sistematización de la información

Para cada una de las zonas industriales priorizadas el Ministerio del Medio Ambiente dispuso de datos de concentraciones de SO<sub>2</sub>, en diferentes resoluciones y formatos, lo que se detalla en el Anexo 3. A continuación se indica, para cada una de las estaciones de calidad del aire consideradas, la correspondiente resolución temporal de los datos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. El procesamiento de la información, para cada zona, se describe en el Anexo 3.

**Tabla 3. Resolución temporal de los datos entregados por el M.M.A.**

Localidad	Región	Nombre de la estación	Periodo de datos disponibles	Unidad	Resolución temporal
Tocopilla	Antofagasta	Escuela E-10	01-01-2011 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		Gobernación	01-01-2010 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
Antofagasta La Negra	Antofagasta	Norte	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Sur	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos

Localidad	Región	Nombre de la estación	Periodo de datos disponibles	Unidad	Resolución temporal
		Coviefi	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
Calama	Antofagasta	Hospital	01-01-2007 a 19-06-2014	ppb	5 minutos
		SML	01-01-2007 a 19-06-2014	ppb	5 minutos
Mejillones	Antofagasta	Ferrocarril	01-01-2011 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		JJ Latorre	01-01-2011 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		Subestación Eléctrica	01-01-2011 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
Copiapó Paipote Tierra Amarilla	Atacama	Copiapó	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Los Volcanes	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Pabellón	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Paipote	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		San Fernando	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Tierra Amarilla	01-10-2000 a 31-05-2014	ppm y µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
Huasco	Atacama	SM1 - Vertedero	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM2 - Quinta La Rosa	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM3 - Compañía de Bomberos Huasco Bajo	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM4 - Carretera Km 40	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM5 - Parcela 5 El Pino	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM6 - Parcela Buena Esperanza	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM7 - Los Loros	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM8 - Freirina	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM9 - Escuela JM Carrera	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
		SM10 - Cuerpo de Bomberos EME	01-02-2005 a 31-12-2013	µg/m <sup>3</sup> N	1 hora
Catemu Llay Llay	Valparaíso	Catemu	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Lo Campo	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Romeral	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos
		Santa Margarita	01-01-2009 a 31-05-2014	µg/m <sup>3</sup> N	5 minutos

Localidad	Región	Nombre de la estación	Periodo de datos disponibles	Unidad	Resolución temporal
Quintero Puchuncaví	Valparaíso	La Greda	01-01-2005 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Los Maitenes	01-01-2005 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Puchuncaví	01-01-2005 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Quintero	01-01-2010 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Sur	01-01-2005 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Valle Alegre	01-01-2005 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
		Quintero GNL	01-01-2010 a 31-05-2014	ppb	1 hora
		Ventanas	12-03-2013 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 minuto
Machalí Coya	O'Higgins	Coya Club	01-01-2000 a 17-06-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	5 minutos
		Coya Población	01-01-2000 a 17-06-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	5 minutos
		Cauquenes	01-01-2000 a 17-06-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	5 minutos
		Cipreses	01-01-2000 a 17-06-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	5 minutos
Lota	Biobío	Lota Urbana	04-09-2009 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Lota Rural	04-09-2009 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Lagunillas	05-09-2009 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
Coronel	Biobío	Coronel Norte	01-01-2011 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Coronel Sur	01-01-2011 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Cerro Merquin	01-01-2011 a 31-12-2013	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
Hualpén	Biobío	Junji	01-07-2004 a 01-01-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Inpesca	01-07-2004 a 01-01-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Indura	13-11-2006 a 01-01-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
		Price	01-01-2009 a 01-01-2014	$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$	1 hora
Talcahuano	Biobío	CAP	01-01-2009 a 30-04-2014	ppb	10 minutos

Con esta información, se procedió a la elaboración de las bases de datos del estudio a distintas resoluciones temporales, utilizando como unidad de concentración microgramos sobre metro cúbico normal ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), de la siguiente manera:

- Base de datos de promedios de 10 minutos.
- Base de datos de promedios de 1 hora.
- Base de datos de promedios de 24 horas.
- Base de datos de promedios anuales.

Cada una de estas bases de datos fueron calculadas en planillas Excel, como promedio fijo del, al menos 75% de los datos correspondiente a cada periodo, de lo contrario se procedió a dejar el valor en blanco. Para el caso de la base de datos anual, ésta fue calculada como promedio de todos los datos presentes en un año dado.

Las bases de datos fueron ordenadas en planillas Excel (.xlsx) para cada zona considerada, en formato de serie de tiempo y utilizando una hoja por cada estación de monitoreo.

Además, para algunas de las zonas consideradas se dispuso de datos de variables meteorológicas, en resolución de 1 hora, las que fueron ordenadas en series de tiempo en formato similar a las bases de datos de concentración de SO<sub>2</sub>.

Con las bases de datos de SO<sub>2</sub> y de meteorología ordenadas se procedió a realizar un análisis de la información, la cual se divide en tres partes, la primera que considera sólo datos calidad del aire asociados a concentraciones de SO<sub>2</sub>, con esto se realizó análisis de:

- Tendencia de acuerdo al comportamiento histórico
- Estadística descriptiva
- Evaluación de escenarios normativos

El segundo corresponde a una evaluación de escenarios normativos donde se consideran tres resoluciones temporales (horario, diario y anual) y tres valores de concentración de SO<sub>2</sub> para cada resolución. Tanto la resolución como las concentraciones de SO<sub>2</sub> son evaluados de acuerdo a requerimiento del Ministerio del Medio ambiente y corresponden a valores replicados de normas internacionales (los resultados de este análisis se incluyen en el Capítulo 5 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS REGULATORIOS).

El tercer análisis corresponde a un análisis meteorológico que considera el comportamiento del SO<sub>2</sub> respecto de las variables dirección y velocidad del viento.

A continuación se describe la metodología utilizada para realizar los análisis de calidad del aire, evaluación de escenarios normativos y meteorología del estudio.

#### 2.2.4. Análisis de Calidad del Aire

Con las bases de datos ordenadas se procedió a realizar el análisis de la información. Se consideró como año de inicio del análisis el 2005 (debido a que desde ese año se obtiene una mayor cantidad de datos) y como año de término el 2013; 2014 no se consideró por ser un año incompleto.

El análisis considera las siguientes etapas:

- Análisis de tendencias de acuerdo al comportamiento histórico
- Estadística descriptiva
- Evaluación de escenarios normativos

##### Análisis de tendencias en zonas priorizadas

El primer análisis considera el despliegue gráfico de todas las estaciones en la mejor resolución temporal de acuerdo a la elaboración de las bases de datos. Por ejemplo, para Quintero – Puchuncaví fue posible elaborar una base de datos con promedios de 10 minutos, por lo tanto, para esa zona se elaboraron gráficos de SO<sub>2</sub> de promedios de 10 minutos para el periodo 2005-2013 para todas las estaciones; por otro lado, en Tocopilla la mejor resolución es una hora, por lo que se elaboraron gráficos en esa resolución; se siguió el mismo criterio para cada zona del estudio.

A partir de los gráficos es posible obtener un análisis cualitativo de la situación histórica y de la tendencia de cada estación de monitoreo.

Las tendencias fueron obtenidas mediante una curva de ajuste lineal sobre los datos, obteniendo la curva de ajuste y el coeficiente de correlación R.

##### Estadística descriptiva

Con las bases de datos de 1 hora se realizó un análisis estadístico para cada año y para cada estaciones de monitoreo. Los estadígrafos considerados fueron los siguientes:

- Número de datos válidos
- Promedio
- Mínimo
- Máximo
- Desviación estándar
- Cuartiles 25, 50 y 75.

Estos estadígrafos fueron obtenidos al procesar la información con el software Origin Lab, luego del proceso de revisión y validación de la información.

Por otra parte, se elaboraron tablas de deciles y percentiles con la siguiente información.

- Deciles 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
- Percentiles 95, 98 y 99.

### 2.2.5. Análisis Meteorológico

La resolución temporal de los datos de meteorología utilizados corresponde a promedios de 1 hora. Por lo tanto, para ser consistentes con el análisis, se cruzó esta información con datos de concentración de SO<sub>2</sub> en la misma resolución temporal.

El análisis meteorológico considera un análisis de peaks en las zonas priorizadas, para esto se definió un peak como la concentración de SO<sub>2</sub>, en promedios de 1 hora, que supera el valor límite 197 µg/m<sup>3</sup>N, que corresponde al valor de escenario más estricto de evaluación de normativa (se verá más en detalle en el Capítulo 5).

Se analizan las concentraciones de SO<sub>2</sub> en función de la meteorología. Para esto se analiza la dirección y velocidad del viento como medio transportador del dióxido de azufre.

El análisis considera el supuesto de que las emisiones de SO<sub>2</sub> son constantes en el tiempo y que los aumentos en las concentraciones son producto de los cambios en la dirección y velocidad del viento. Este supuesto se considera porque no se tiene información de los procesos industriales en cada una de las zonas estudiadas, así, si las concentraciones aumentan bruscamente producto de alguna operación industrial, el aumento será atribuido a las condiciones meteorológicas imperantes y no al aumento en las emisiones de SO<sub>2</sub>.

Se analizan las estaciones seleccionadas, de acuerdo al criterio del percentil 99, de las 10 zonas priorizadas, utilizando la información de meteorología de la misma estación o de una estación cercana que represente el comportamiento del viento en la zona.

Para el análisis se grafica la correlación entre dirección y velocidad del viento en función de las concentraciones de dióxido de azufre.

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Disposición geográfica de las estaciones de calidad del aire

A partir de las coordenadas de las estaciones de calidad del aire de la Tabla 2, se estableció su ubicación geográfica en Google Earth desde donde se extrajeron imágenes para cada zona considerada en el estudio. Los correspondientes mapas de cada una de las zonas se muestran en el Anexo 1.

### 2.3.2. Análisis de Calidad del Aire

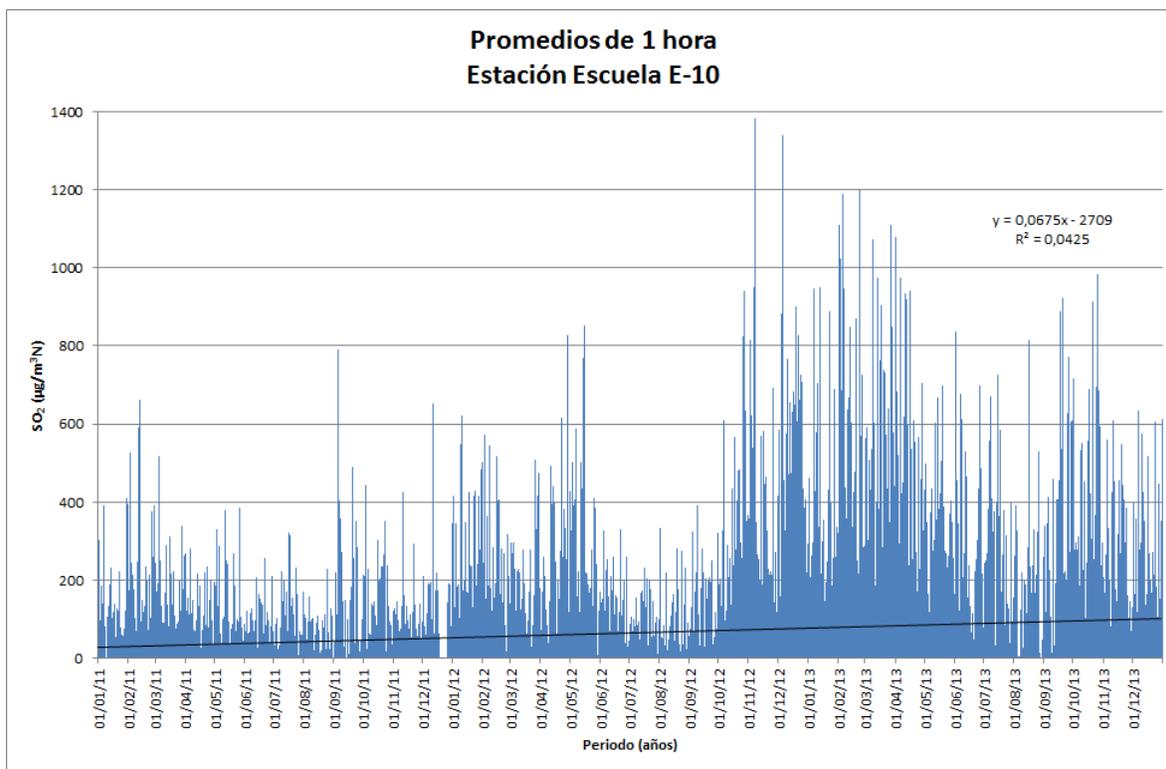
A continuación se presentan los resultados de las series de tiempo para cada una de las estaciones de calidad del aire de las zonas priorizadas en este estudio. Se realiza un despliegue gráfico en la mejor resolución disponible a una escala comparable entre las estaciones de una misma zona priorizada y luego a una escala que permita observar el comportamiento de las concentraciones.

Los promedios de 10 minutos serán mostrados en color verde, mientras que los promedios de 1 hora en color azul.

Además en las figuras se indica la línea de tendencia de la serie con su correspondiente ecuación.

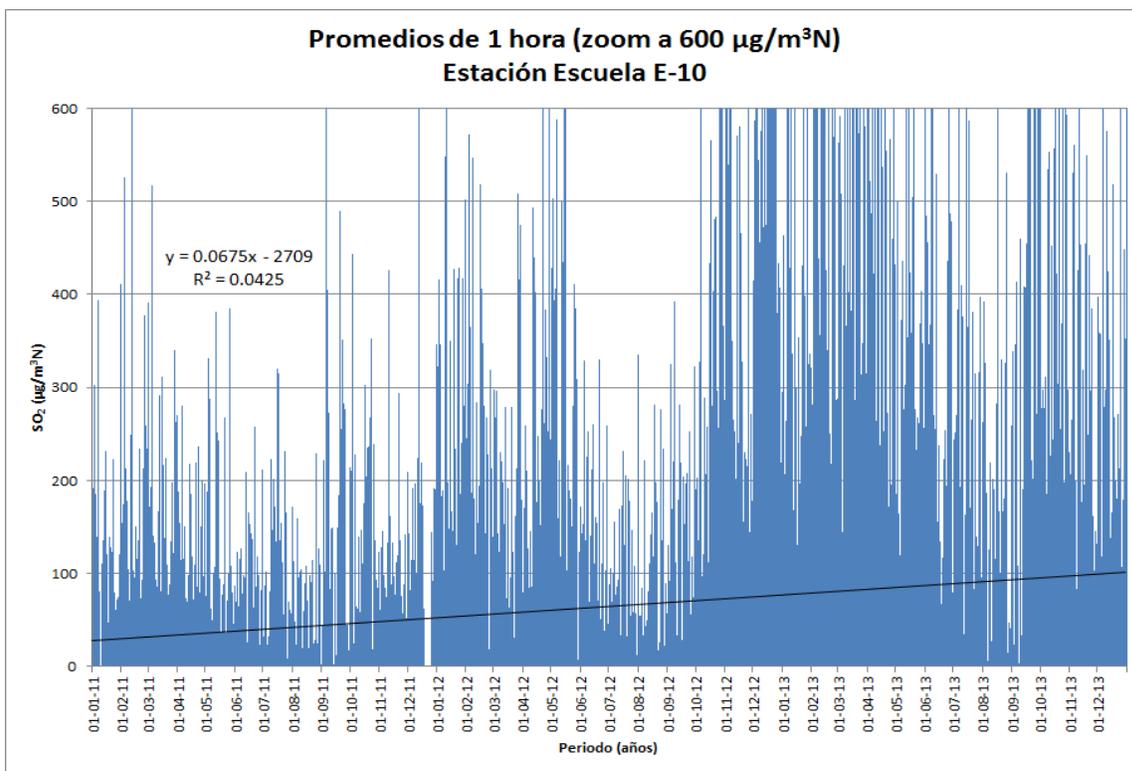
## i) TOCOPILLA

Las estaciones de calidad del aire consideradas en Tocopilla corresponden a la estación Escuela E-10 y estación Gobernación.



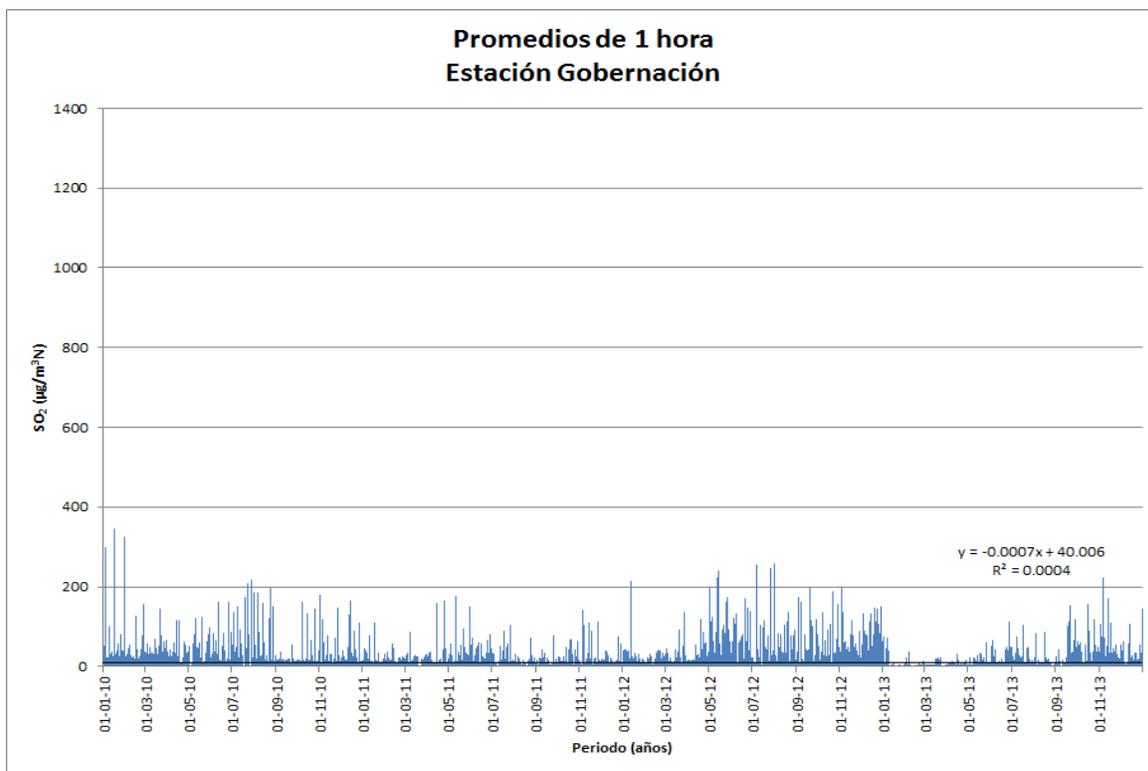
**Figura 1. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación escuela E-10, Tocopilla**

La Figura 1 muestra el promedio fijo de 1 hora de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, correspondiente a la mejor resolución posible entre los años 2011 y 2013. En términos generales, se puede apreciar un aumento en las concentraciones hacia los años 2012 y 2013, ocurriendo durante el año 2012 el mayor peak de concentraciones del periodo: 1384 µg/m<sup>3</sup>N el día 07-11-2012 a las 12:00 horas. El segundo y tercer mayor peak, también se producen durante el año 2012, con valores de 1339 y 1255 µg/m<sup>3</sup>N.



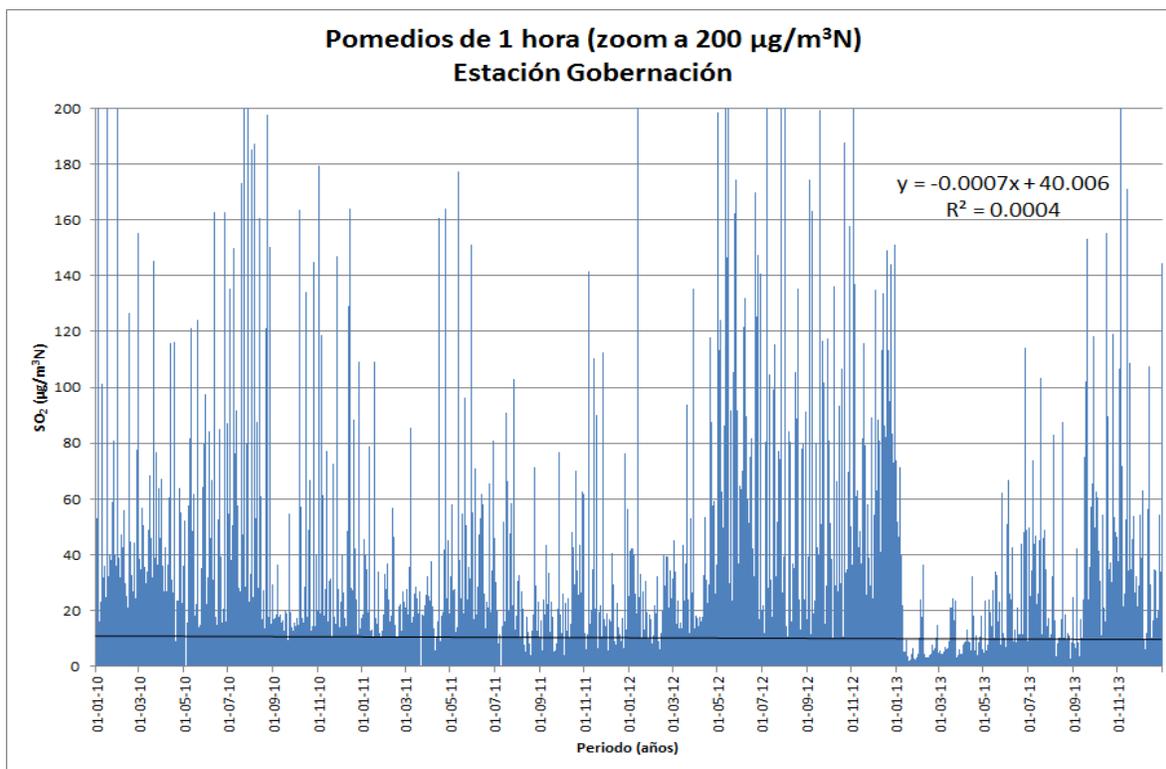
**Figura 2. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de  $\text{SO}_2$ . Estación escuela E-10, Tocopilla, zoom a  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ .**

La Figura 2 muestra las concentraciones de 1 hora para la estación Escuela E-10, con un zoom en el eje “y” a  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ; ésto para observar con mayor detalle el grueso de las concentraciones. Se observa una tendencia positiva en las concentraciones.



**Figura 3 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Gobernación, Tocopilla**

Las concentraciones en la estación Gobernación, son menores a lo observado en la estación Escuela E-10. Los mayores peaks horarios de concentraciones no superan los 400 µg/m<sup>3</sup>N.

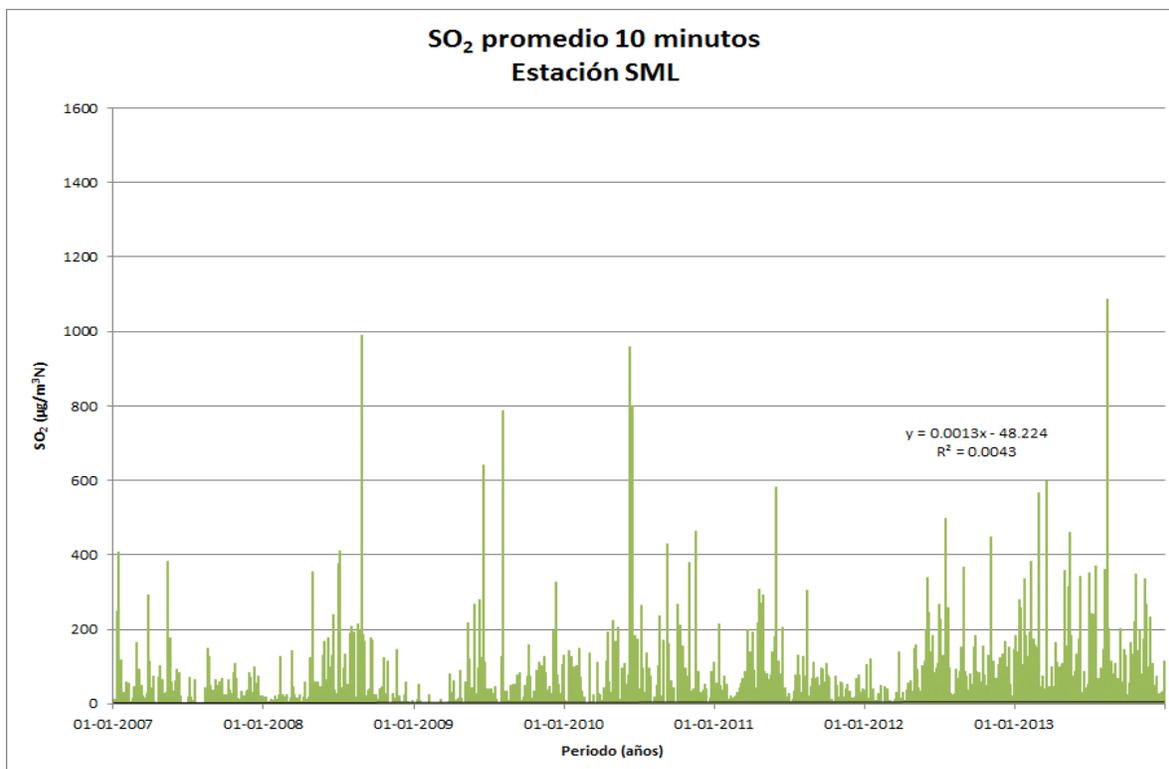


**Figura 4. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de  $\text{SO}_2$  Estación Gobernación, Tocopilla, zoom a 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ .**

El zoom a 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  permite observar las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en la estación Gobernación. Se puede apreciar que la línea de tendencia no presenta una pendiente, es decir, no hay tendencia en las concentraciones en esta estación.

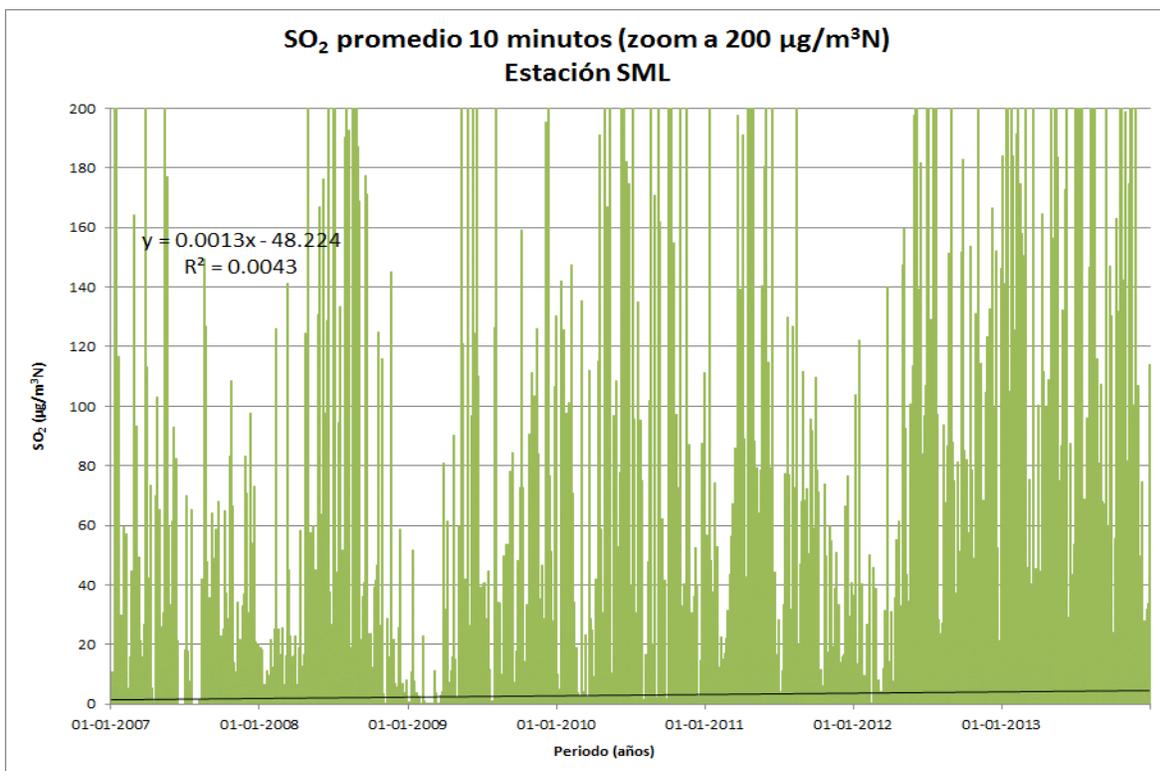
## ii) CALAMA

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Servicio Médico Legal (SML) y Hospital del cobre. Las siguientes figuras muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio.



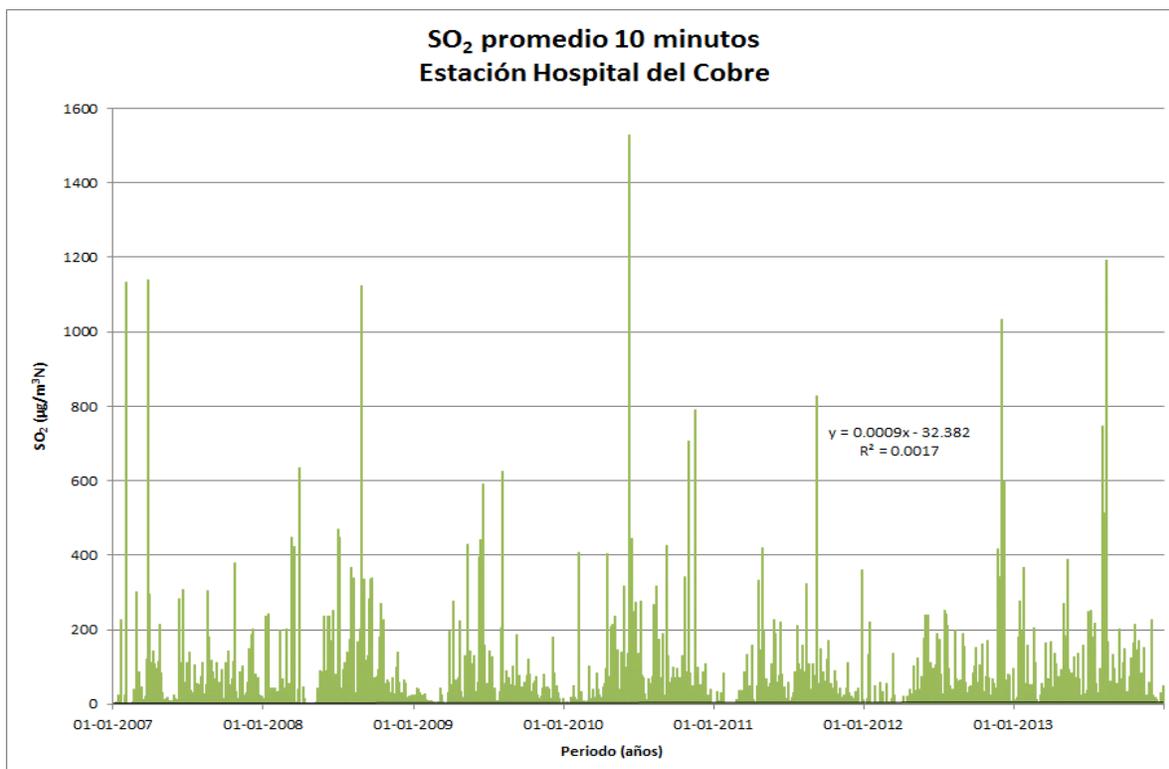
**Figura 5. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub> Estación Servicio Médico Legal (SML), Calama**

Se puede apreciar que las concentraciones se mantienen en general, bajo la línea de los 200 µg/m<sup>3</sup>N, con alzas alrededor de los 500 – 600 µg/m<sup>3</sup>N y un menor número de episodios por sobre 600 µg/m<sup>3</sup>N entre los años 2007 y 2013.



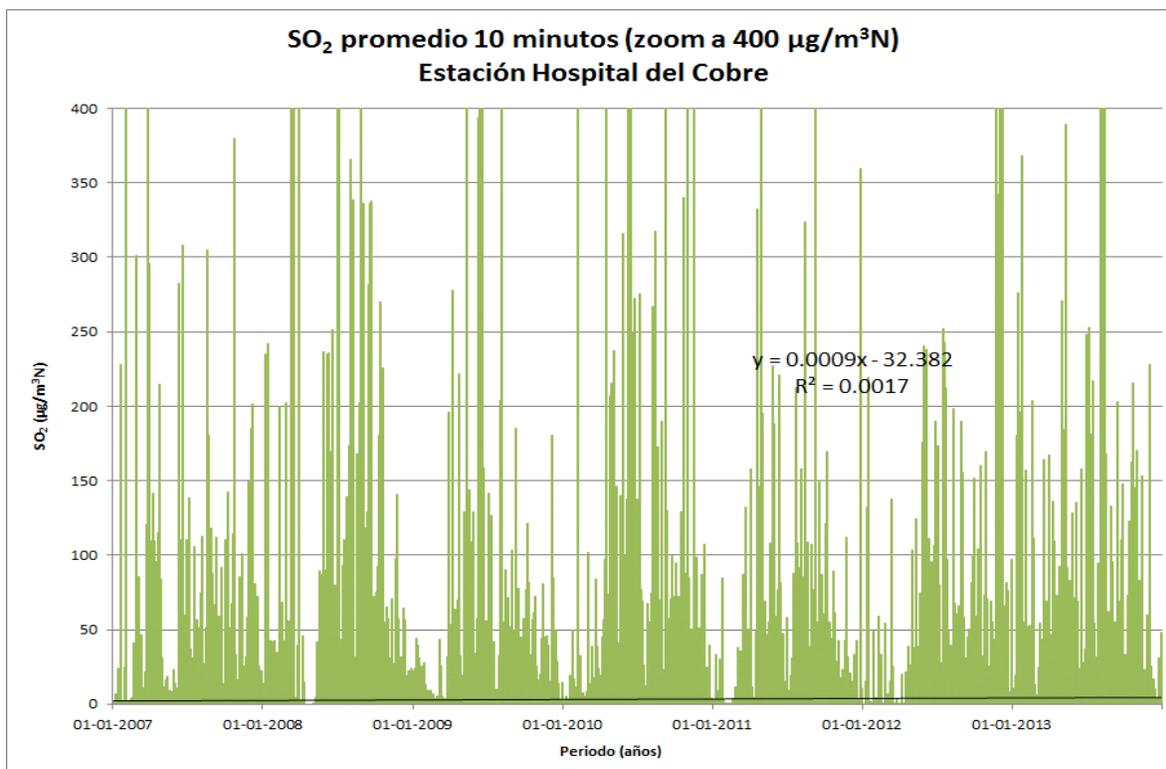
**Figura 6. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Servicio Médico Legal (SML), Calama, zoom a 200 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 200 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia positiva en las concentraciones. Durante el año 2013 las concentraciones son ligeramente superiores a los otros años.



**Figura 7. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Hospital del Cobre, Calama**

Las concentraciones de 10 minutos en la estación Hospital del Cobre presentan peaks aislados que superan los 1000 µg/m<sup>3</sup>N entre el 2007 y 2013. En general, se observa que los aumentos se producen durante los meses invernales.

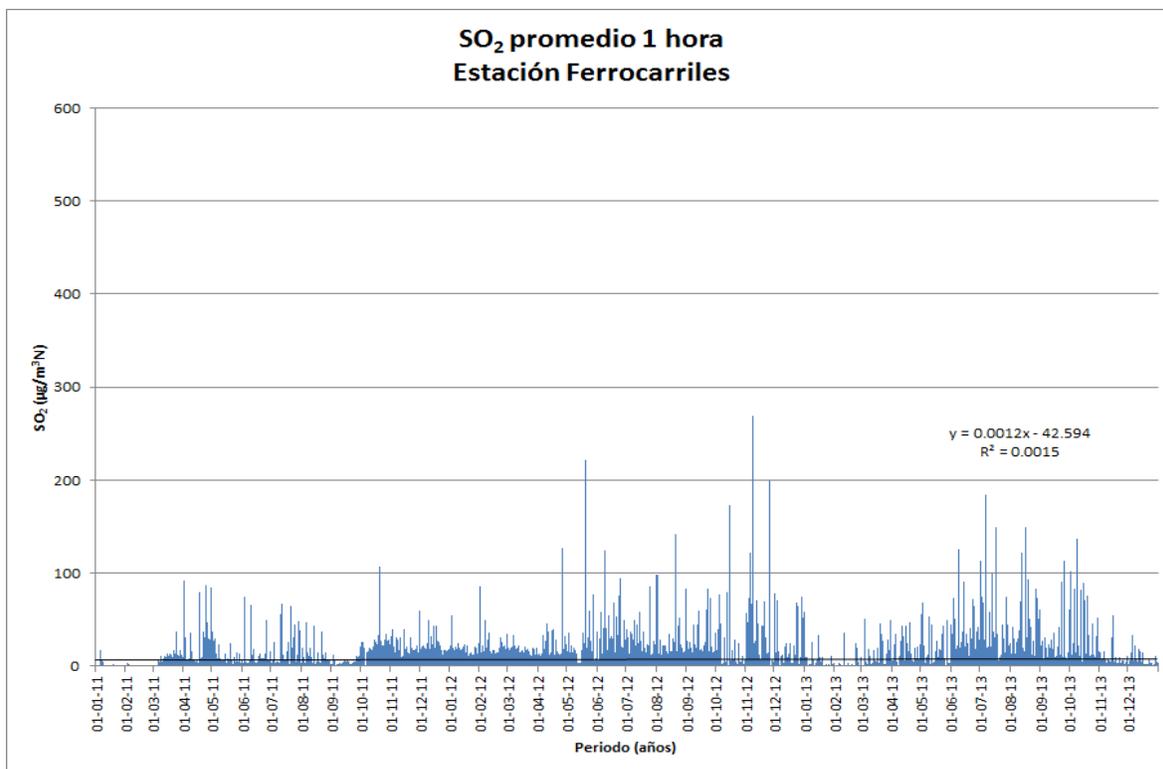


**Figura 8. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Hospital del Cobre, Calama, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

La figura muestra las concentraciones en la estación Hospital del Cobre con un zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N en el eje y. Se puede apreciar con mayor detalle una posible estacionalidad en las concentraciones, con aumentos durante el invierno y disminuciones en verano, en general. La línea de ajuste, muestra una ligera tendencia al aumento en las concentraciones (casi despreciable).

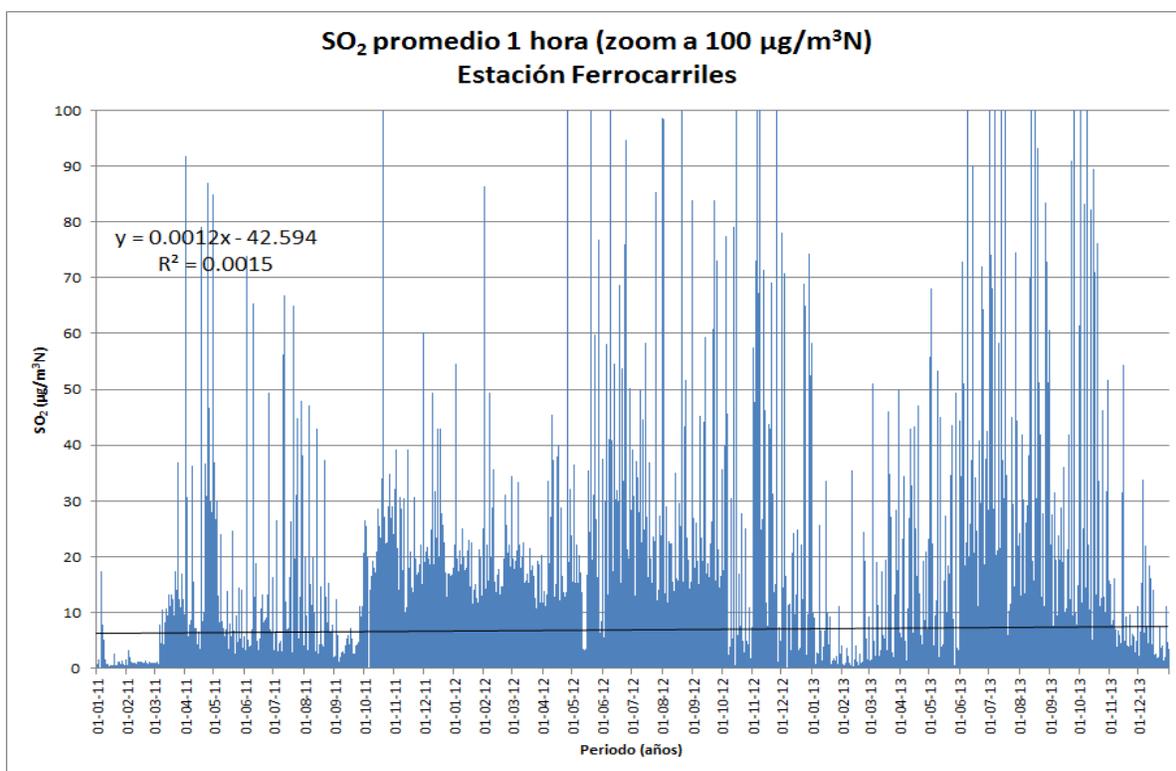
### iii) MEJILLONES

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Ferrocarriles, JJ Latorre y Subestación Eléctrica. Las siguientes figuras muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 1 hora, para el periodo considerado en el estudio.



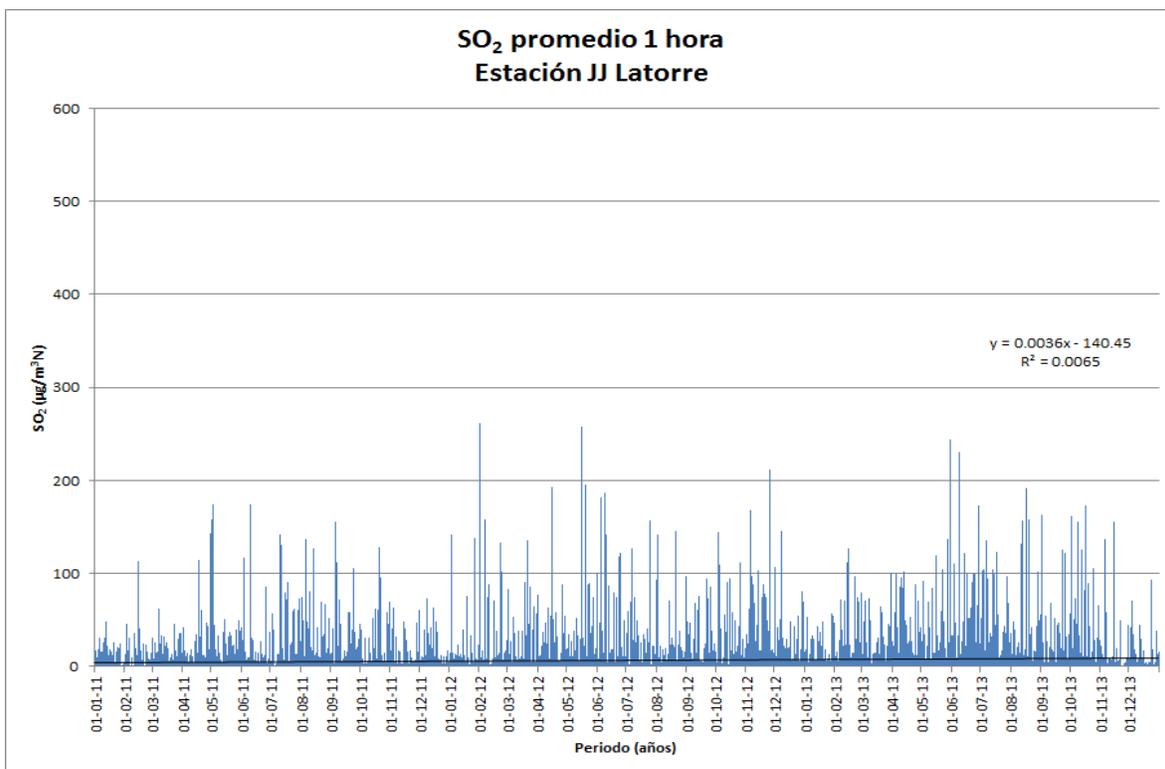
**Figura 9. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Ferrocarriles, Mejillones**

Las concentraciones en la estación Ferrocarriles para el periodo 2011 a 2013, se presentan en su mayoría, por debajo de 100 µg/m<sup>3</sup>N, salvo en ocasiones con aumentos. Se puede observar un aumento en la ocurrencia de peaks superiores a 100 µg/m<sup>3</sup>N en los años 2012 y 2013.



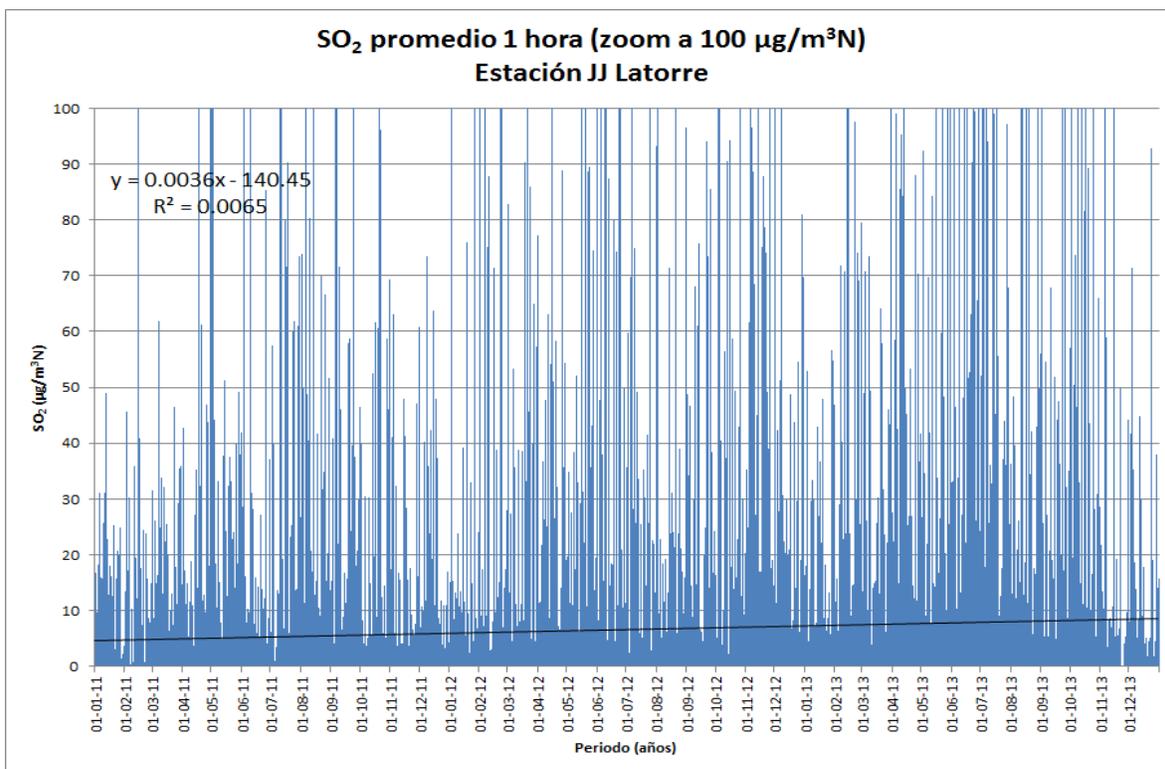
**Figura 10. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Ferrocarriles, Mejillones, zoom a 100 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la Figura 10 se aprecian las concentraciones iguales o inferiores a 100 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Ferrocarriles. Se puede observar la existencia de periodos de altas concentraciones relativas y periodos con bajas concentraciones relativas. Desde enero hasta octubre de 2011 las concentraciones se mantuvieron bajas, y luego entre enero y abril de 2013. La ocurrencia de estos periodos podría deberse al comportamientos de las emisiones locales. La curva de tendencia muestra una ligera tendencia positiva.



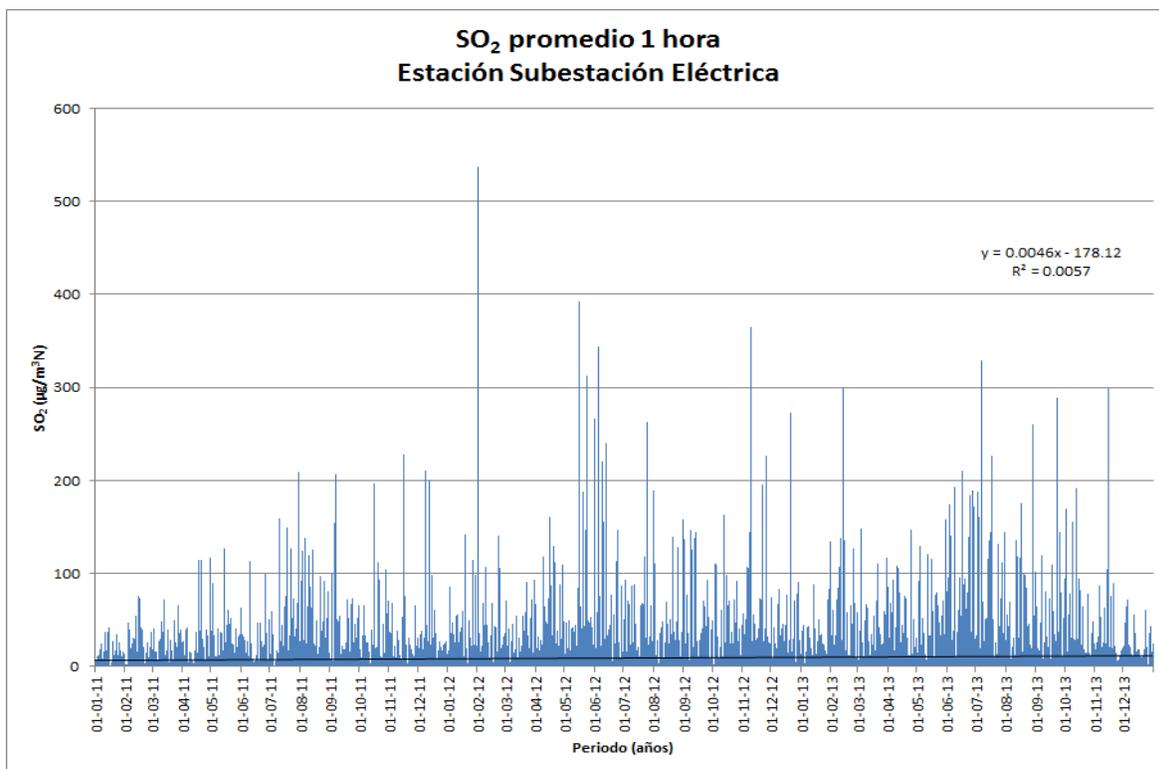
**Figura 11. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación JJ Latorre, Mejillones**

En la estación JJ Latorre, las concentraciones en general se mantienen entre 0 y 100 µg/m<sup>3</sup>N, con peaks de concentración que no superan los 300 µg/m<sup>3</sup>N.



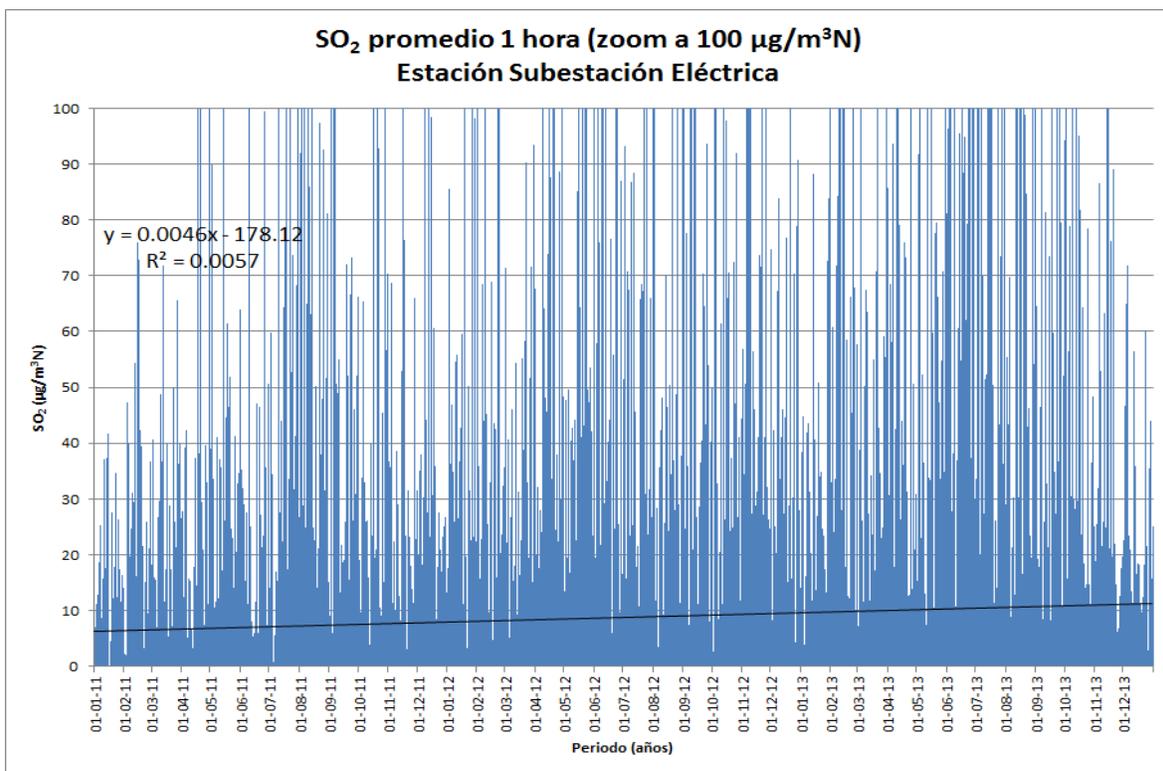
**Figura 12. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación JJ Latorre, Mejillones, zoom a 100 µg/m<sup>3</sup>N.**

El gráfico con un zoom a 100 µg/m<sup>3</sup>N muestra un aumento en las concentraciones en el tiempo. La línea de tendencia lineal también lo refleja.



**Figura 13. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

Las concentraciones horarias en la estación Subestación Eléctrica muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 100 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 200 ó 300 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 01-02-2012 a las 09:00 horas y fue de 537 µg/m<sup>3</sup>N.

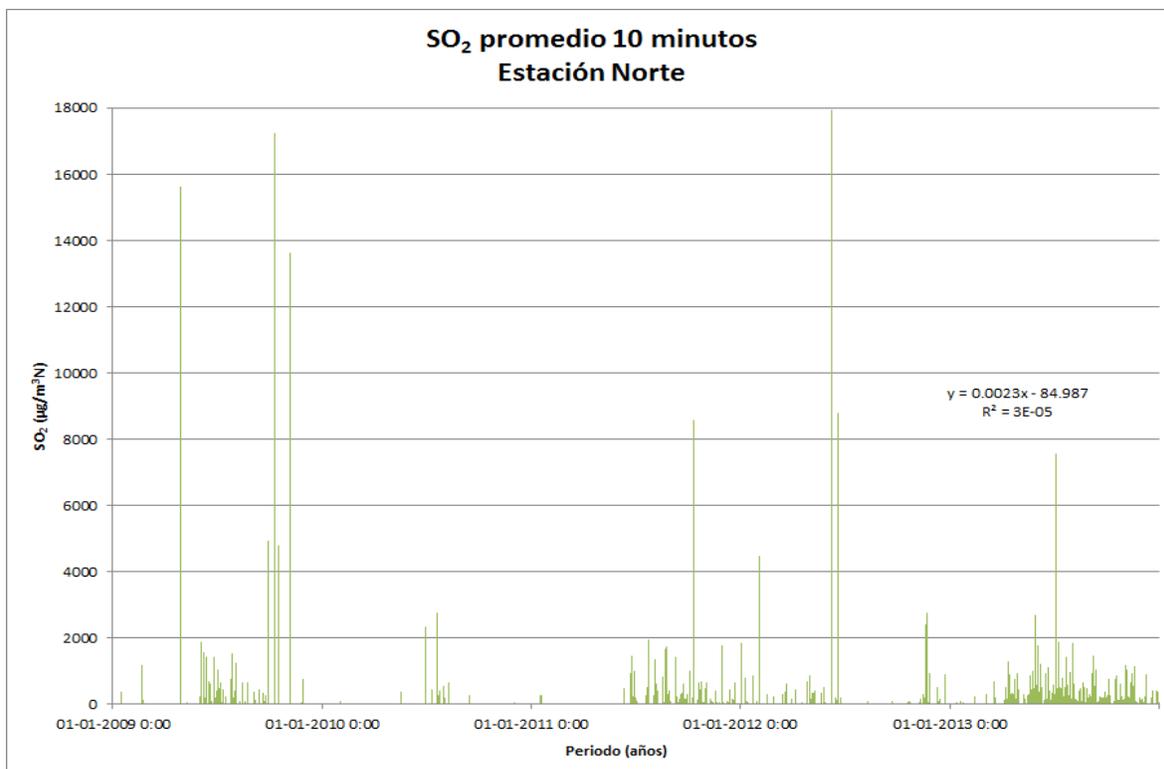


**Figura 14. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Subestación Eléctrica, Mejillones, zoom a 100 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 100 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Subestación Eléctrica, muestran que existe una ligera tendencia al aumento en las concentraciones.

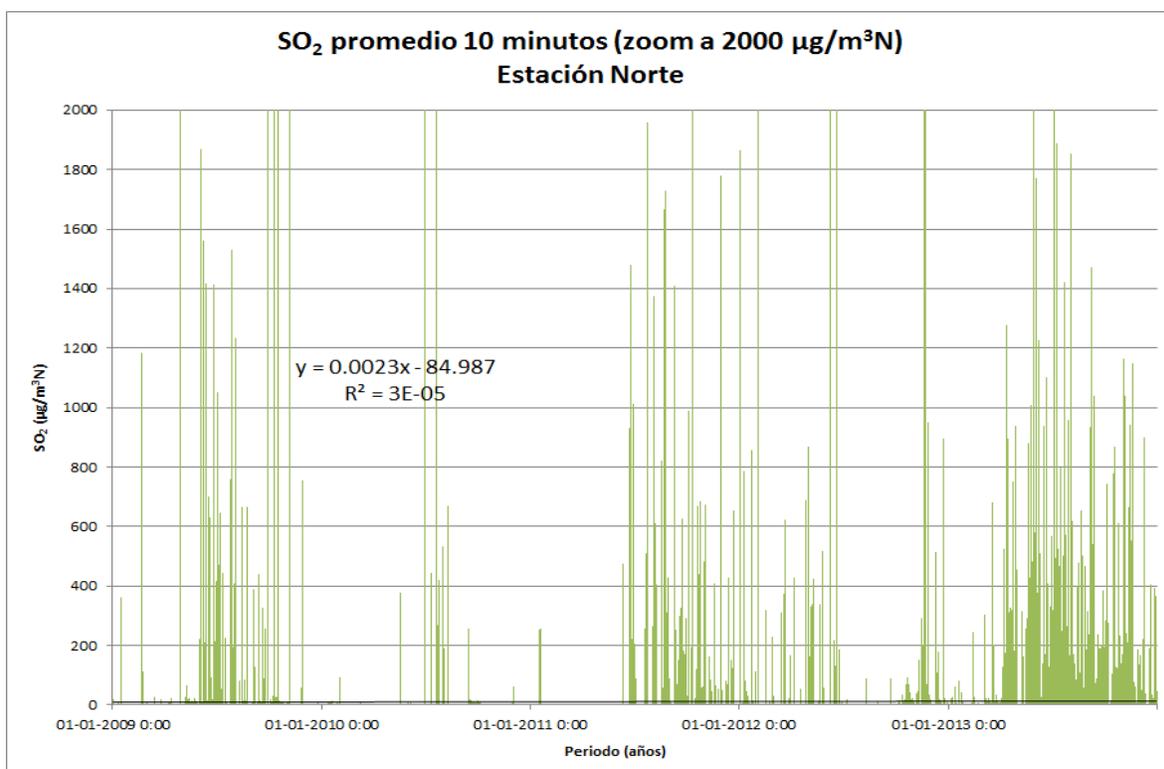
#### iv) ANTOFAGASTA – LA NEGRA

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Norte y Sur en el sector de La Negra y a Coviefi en la ciudad de Antofagasta. Las figuras a continuación muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio.



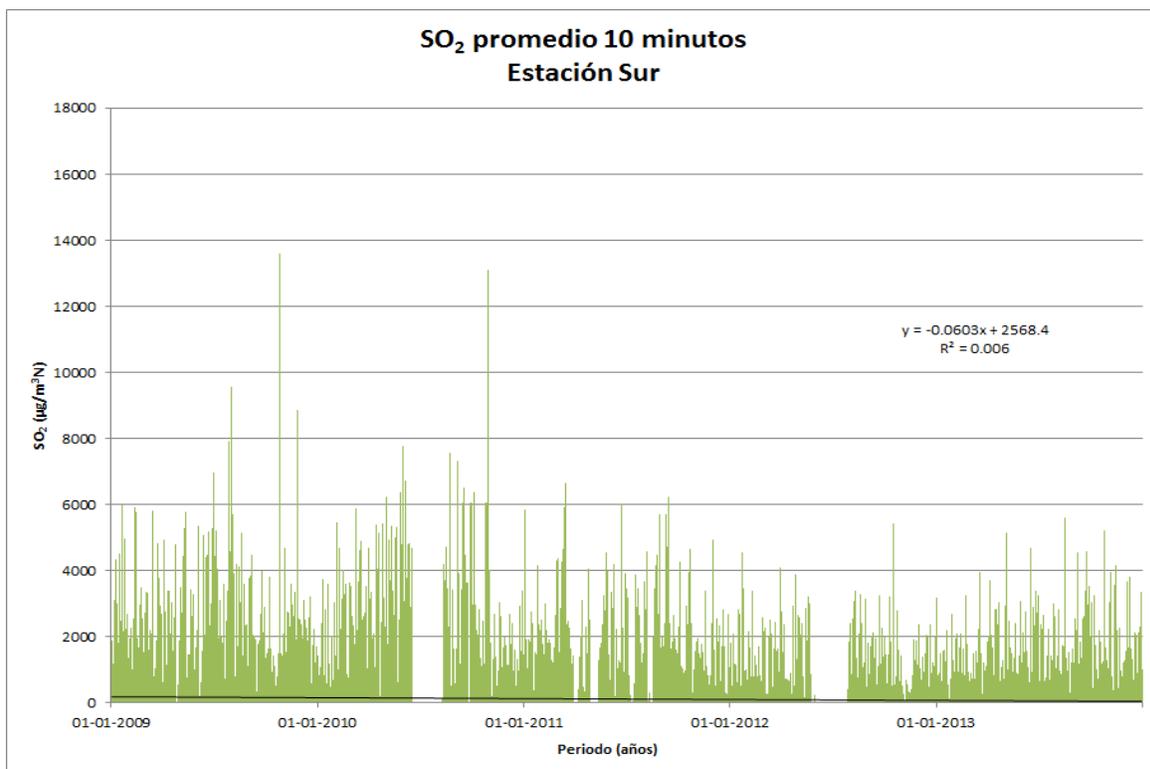
**Figura 15. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Norte, La Negra.**

En la estación Norte, se aprecia que las alzas en las concentraciones ocurren solo algunos momentos del año, y con valores bajo los 2000 µg/m<sup>3</sup>N. No obstante, también se observa la ocurrencia de valores extremos altos, incluso superiores a los 10000 µg/m<sup>3</sup>N. Estos episodios aislados, podrían estar asociados a un aumento en las emisiones y a un empeoramiento brusco en las condiciones de ventilación en la zona.



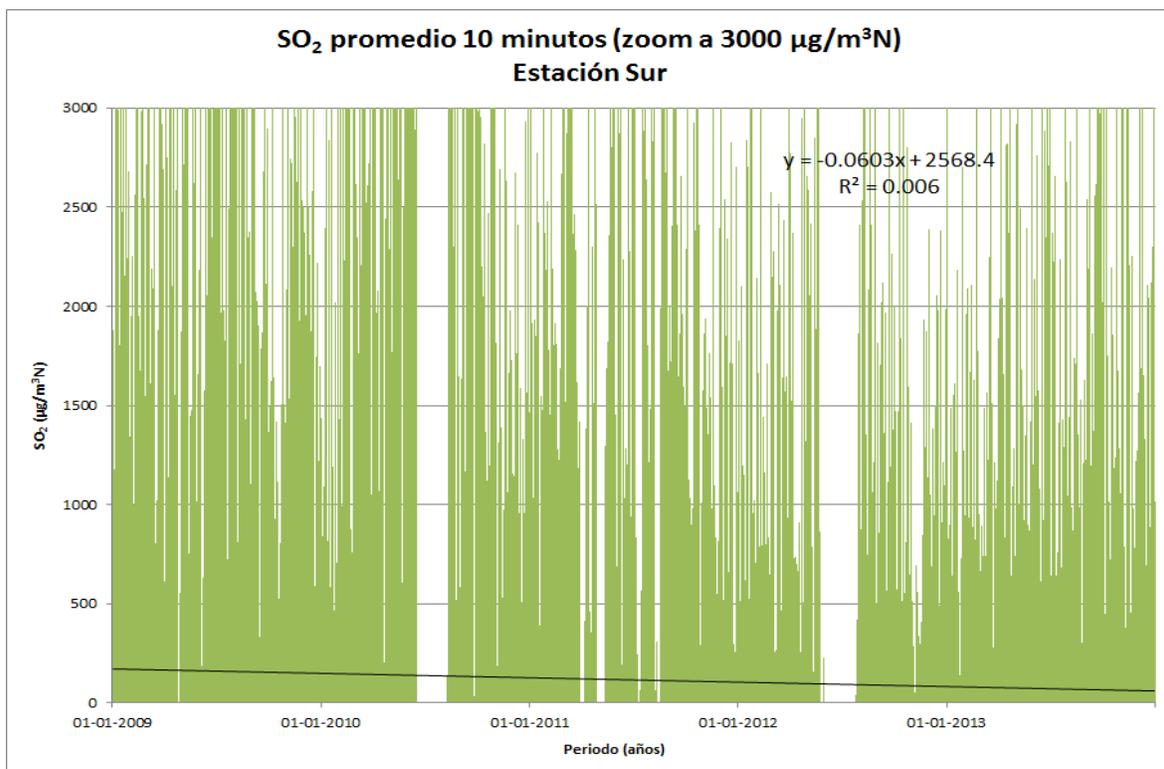
**Figura 16. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Norte, La Negra, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar solo las concentraciones iguales o inferiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N, se observa que las concentraciones tienden a aumentar gradualmente en el tiempo. Durante el año 2013 se aprecia una mayor cantidad de horas con concentraciones sobre los 400 µg/m<sup>3</sup>N.



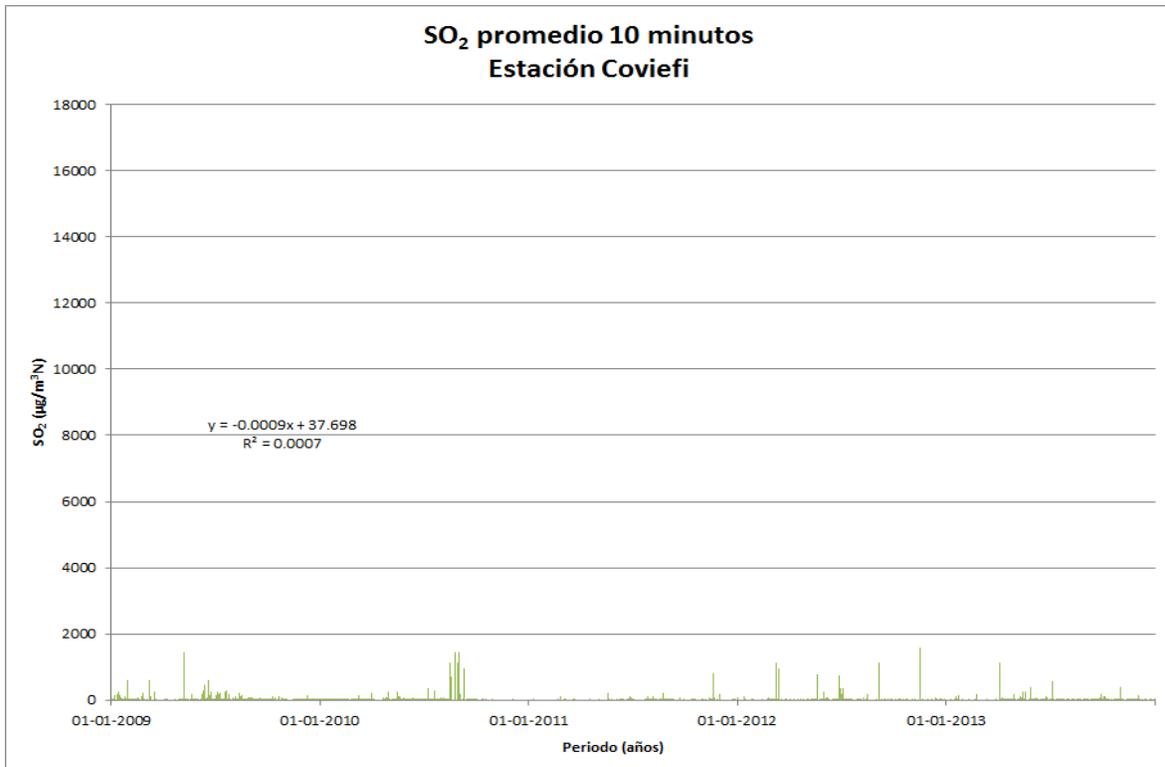
**Figura 17. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Sur, La Negra**

En la estación Sur se observa que, a diferencia de lo observado en Norte, las concentraciones presentan una mayor magnitud media. Los valores superan constantemente los 2000 µg/m<sup>3</sup>N. En dos ocasiones, los valores horarios superan los 12000 µg/m<sup>3</sup>N.



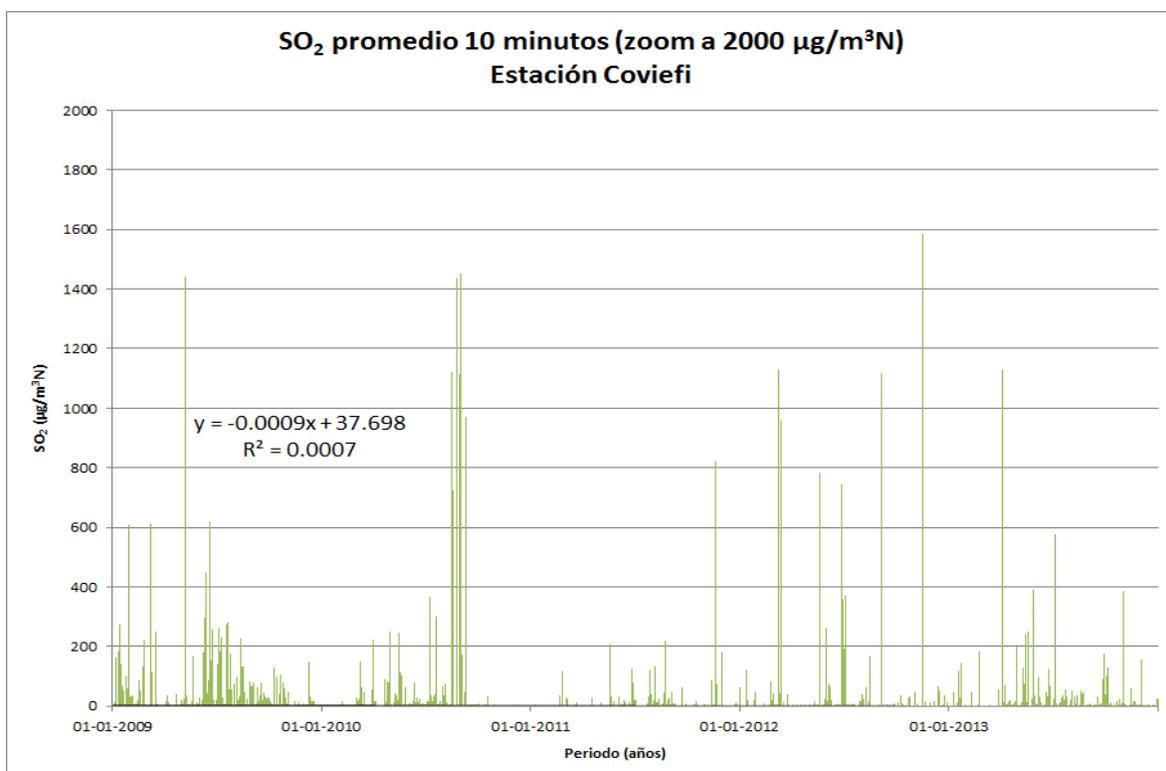
**Figura 18. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Sur, La Negra, zoom a 3000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones en Sur, bajo los 3000 µg/m<sup>3</sup>N se aprecia que la curva de tendencia lineal muestra una disminución en las concentraciones entre 2009 y 2013; los episodios de altas concentraciones siguen sucediendo, aunque con menor frecuencia.



**Figura 19. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coviefi, Antofagasta**

Los peaks en Coviefi son considerablemente menores que lo observado en Norte y Sur.

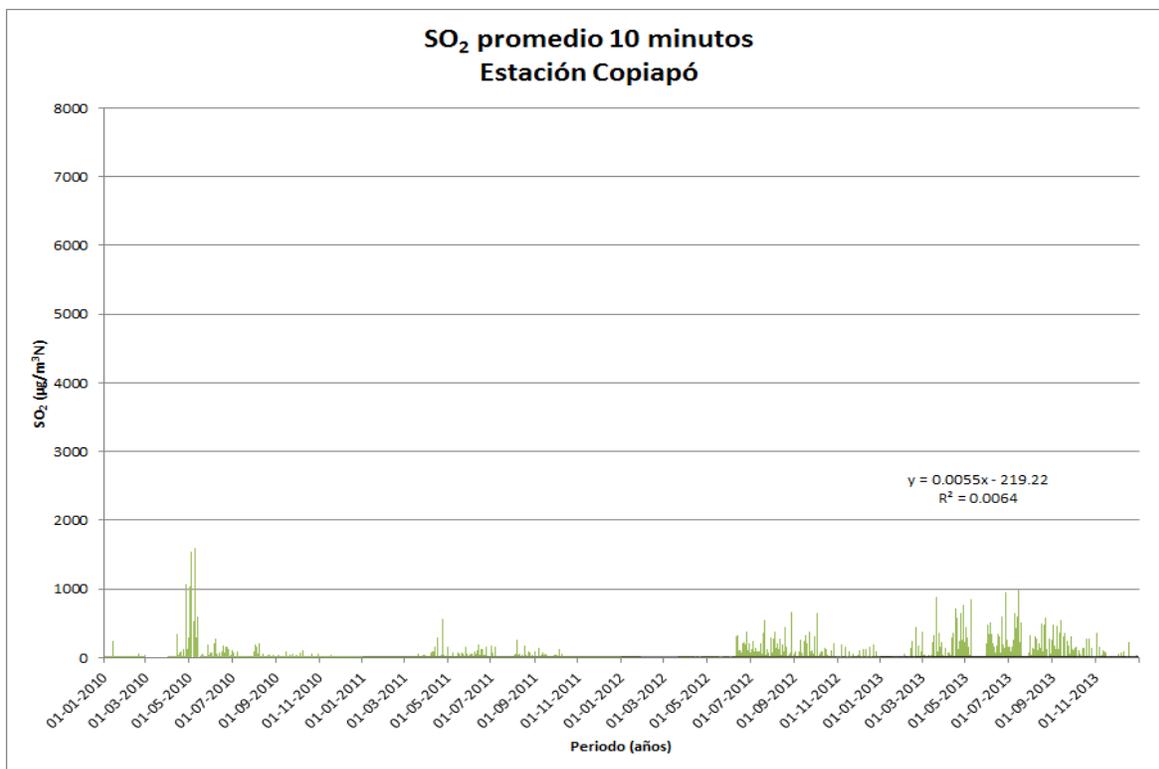


**Figura 20. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coviefi, Antofagasta, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En el gráfico se observa que si bien existen peaks de concentraciones que superan los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, éstos no son tan frecuentes. Las concentraciones medias en Coviefi, son del orden de los 5 a 10 µg/m<sup>3</sup>N, es por esto que la curva de tendencia lineal no se observa en el gráfico; sin embargo, la tendencia es a disminuir ligeramente las concentraciones.

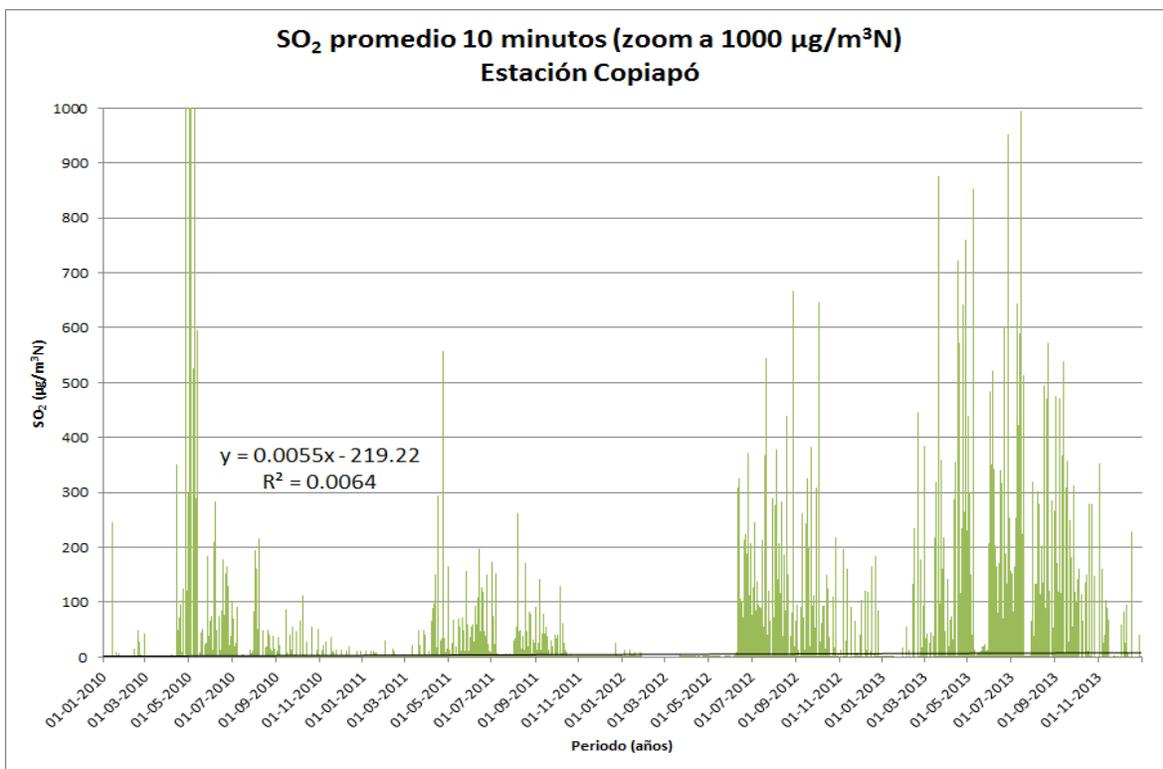
### v) COPIAPÓ – PAIPOTE - TIERRA AMARILLA

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Copiapó, Los Volcanes, San Fernando, Paipote, Tierra Amarilla y Pabellón. A continuación se muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio.



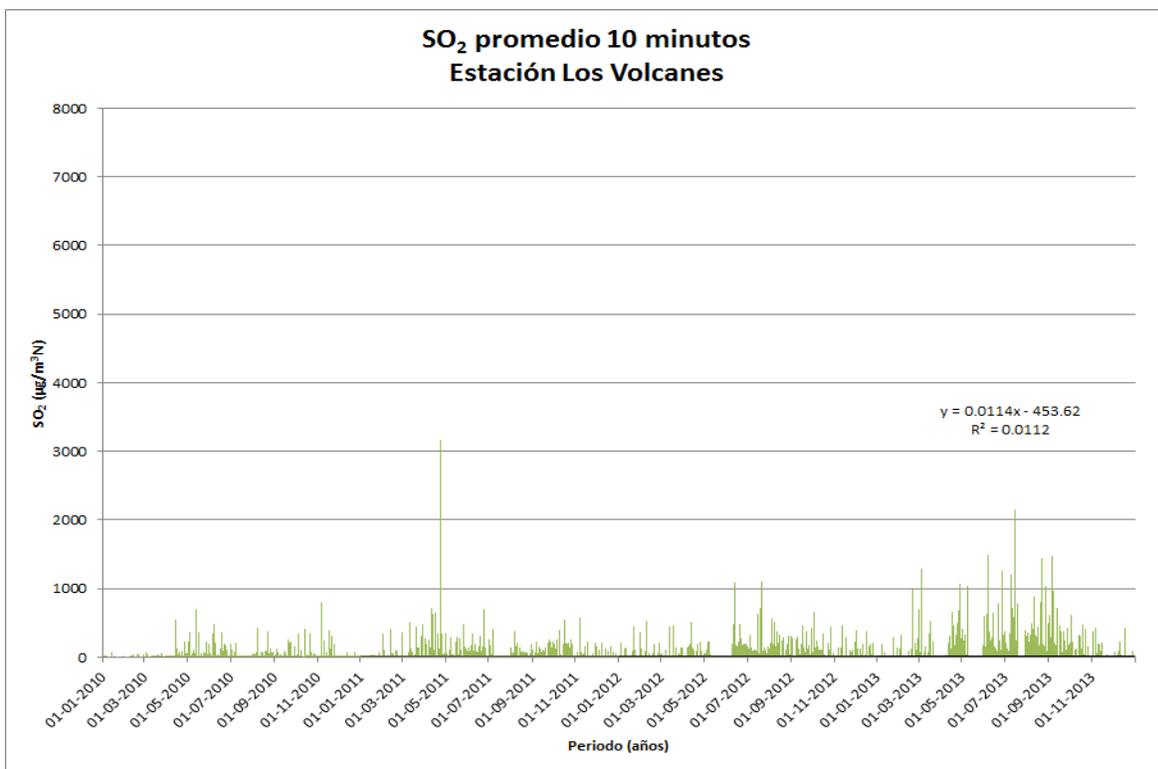
**Figura 21. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Copiapó, Copiapó**

En la estación Copiapó, las concentraciones se mantienen en niveles bajos, salvo la ocurrencia de peaks que alcanzan valores en torno a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.



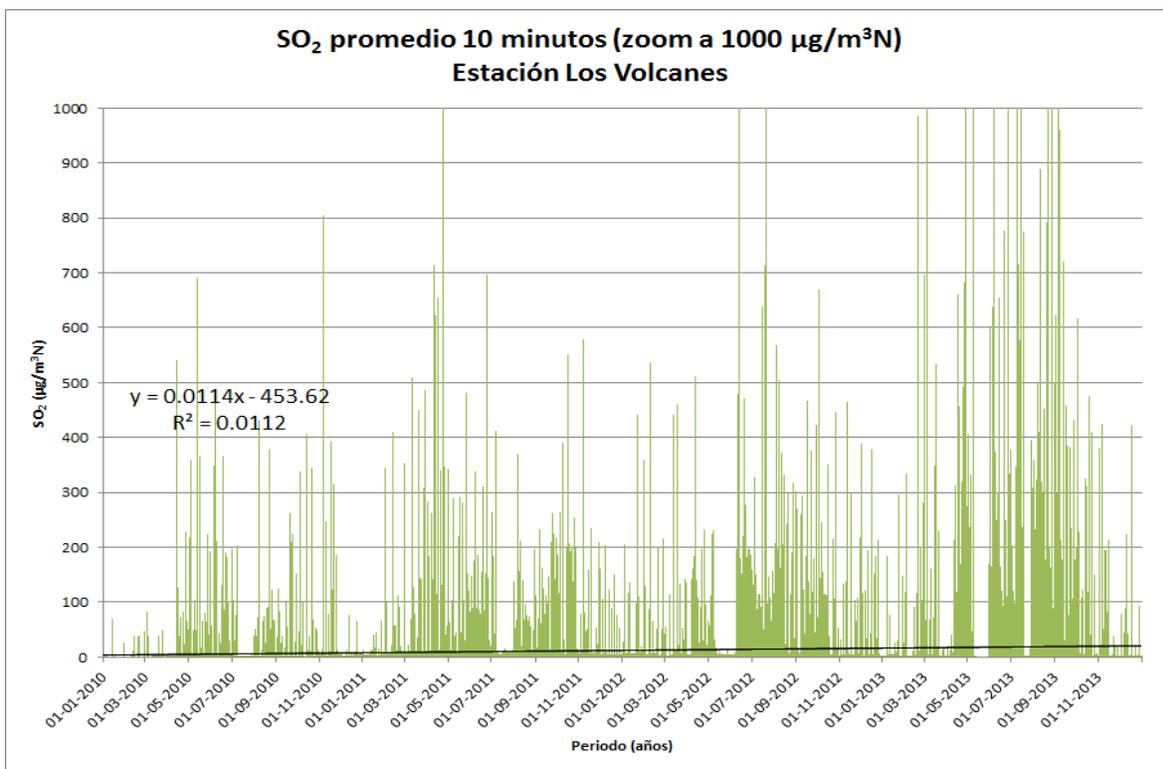
**Figura 22. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Copiapó, Copiapó, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Bajando la escala de observación, hasta los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, se observa que durante 2012 y 2013 las concentraciones aumentaron en comparación a los otros años, la línea de tendencia muestra una ligera tendencia positiva en las concentraciones.



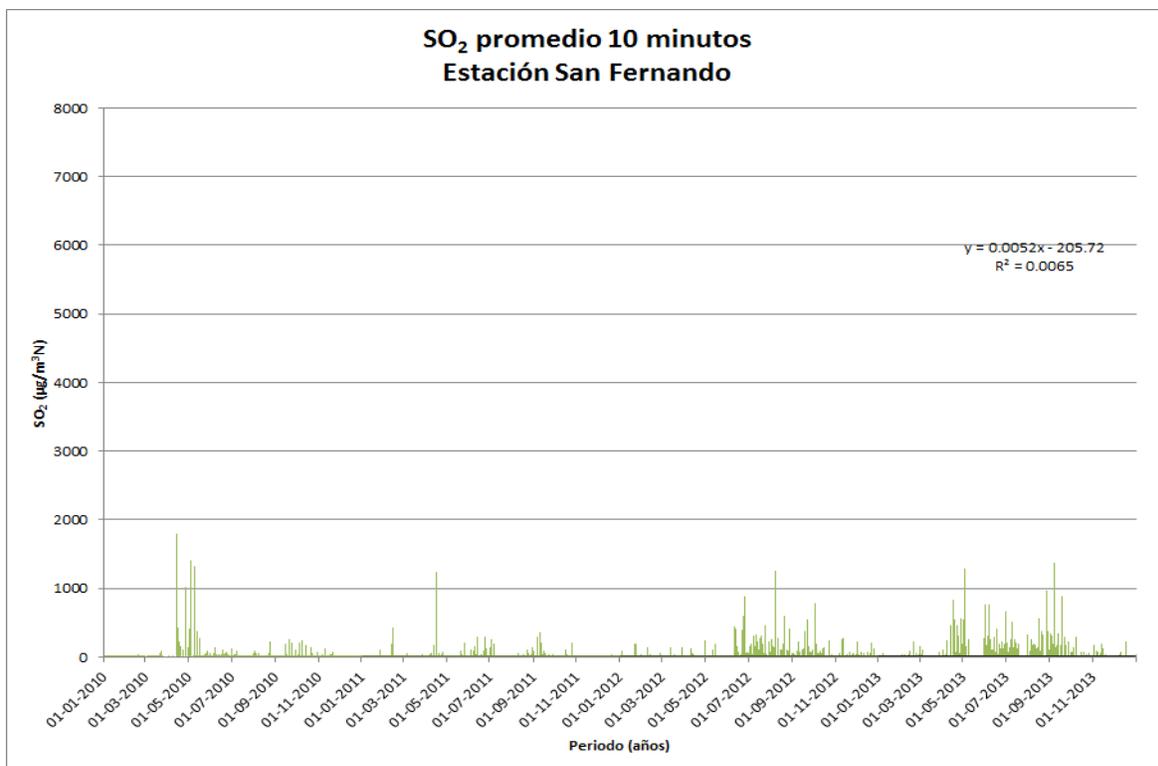
**Figura 23. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Los Volcanes, Copiapó**

En la estación Los Volcanes, destaca la ocurrencia de un único peak de concentraciones superior a 3000 µg/m<sup>3</sup>N. Hacia el año 2013 las concentraciones tienden a aumentar.



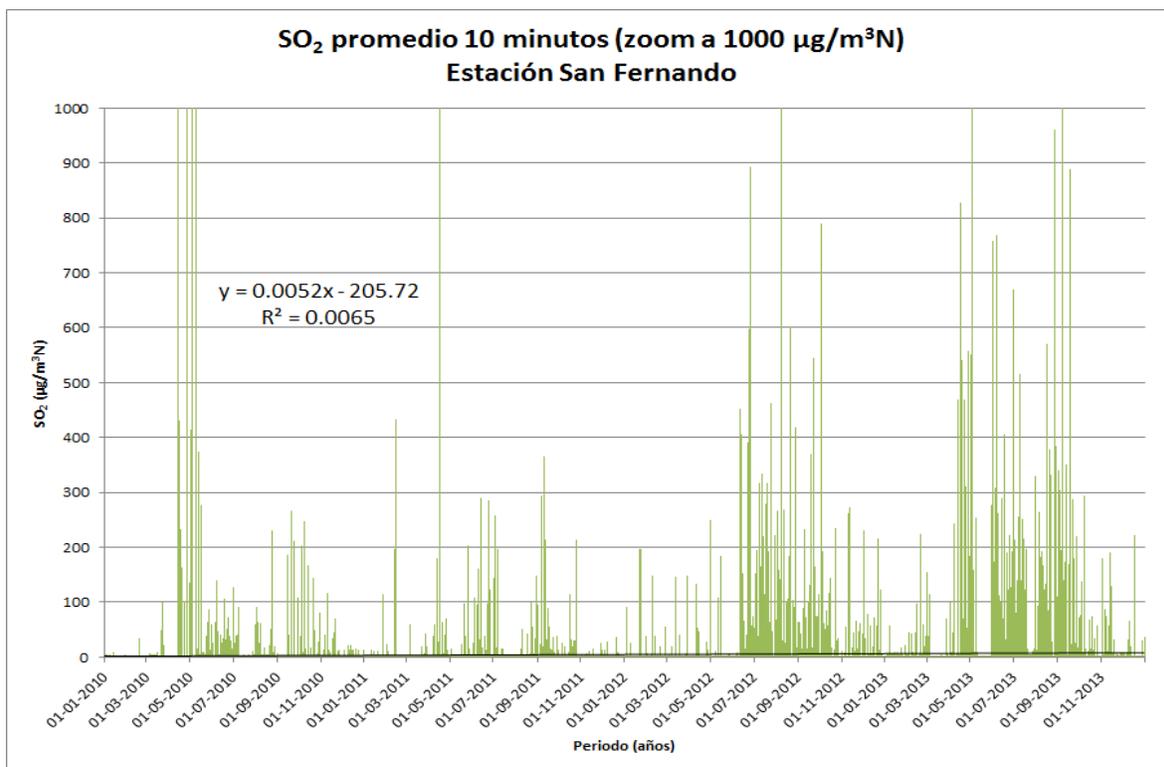
**Figura 24. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Los Volcanes, Copiapó, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar el zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N, se aprecia que la línea de tendencia muestra un aumento gradual en las concentraciones hacia el último año analizado (2013).



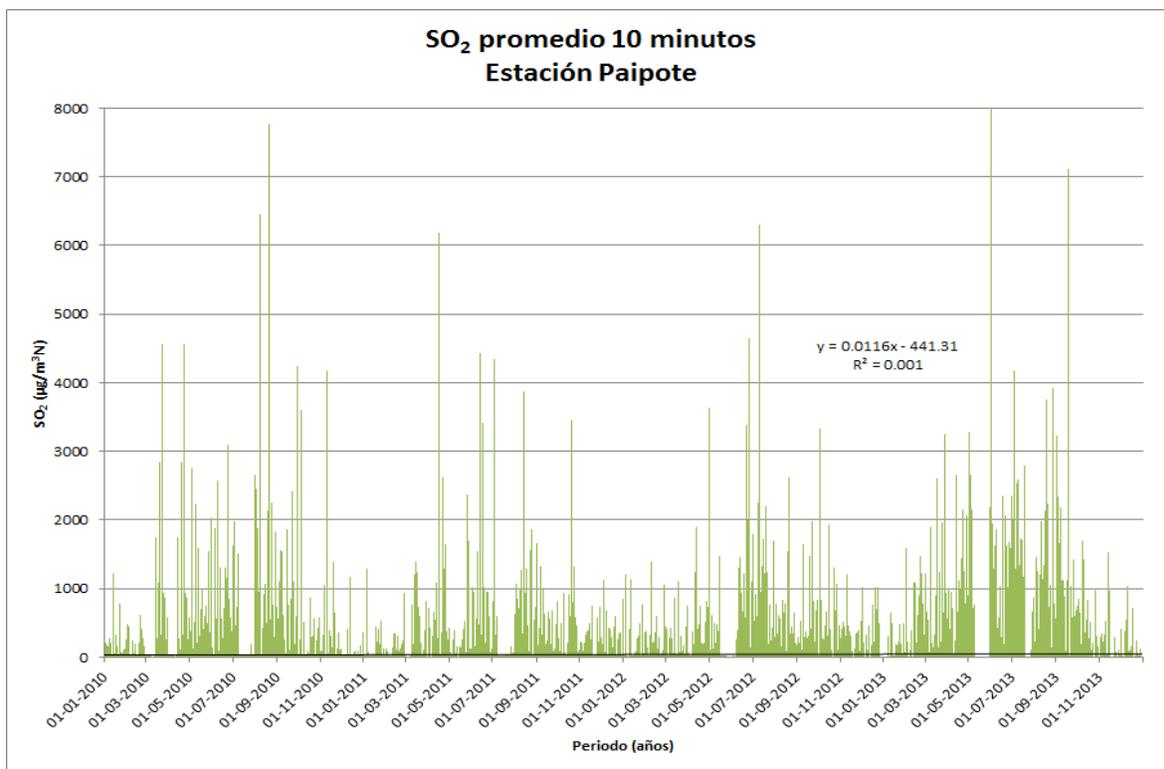
**Figura 25. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación San Fernando, Paipote**

En la estación San Fernando, se aprecia un comportamiento similar a lo observado en Los Volcanes, con concentraciones en general bajas, peaks aislados cercanos a 1000 µg/m<sup>3</sup>N, y un aumento en las concentraciones hacia el final del periodo.



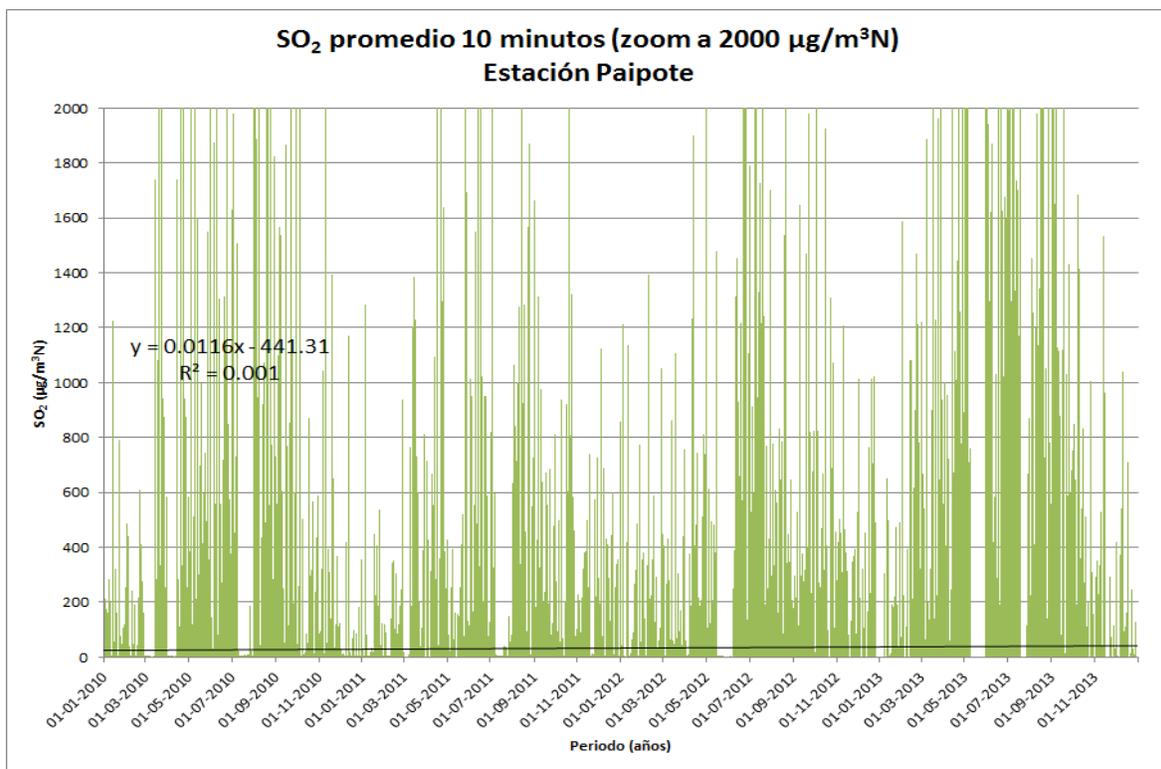
**Figura 26. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación San Fernando, Paipote, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

La línea de tendencia, muestra que existe un ligero aumento en las concentraciones hacia el año 2013. La ocurrencia de peaks horarios superiores o cercanos a 1000 µg/m<sup>3</sup>N aumentó en el último año.



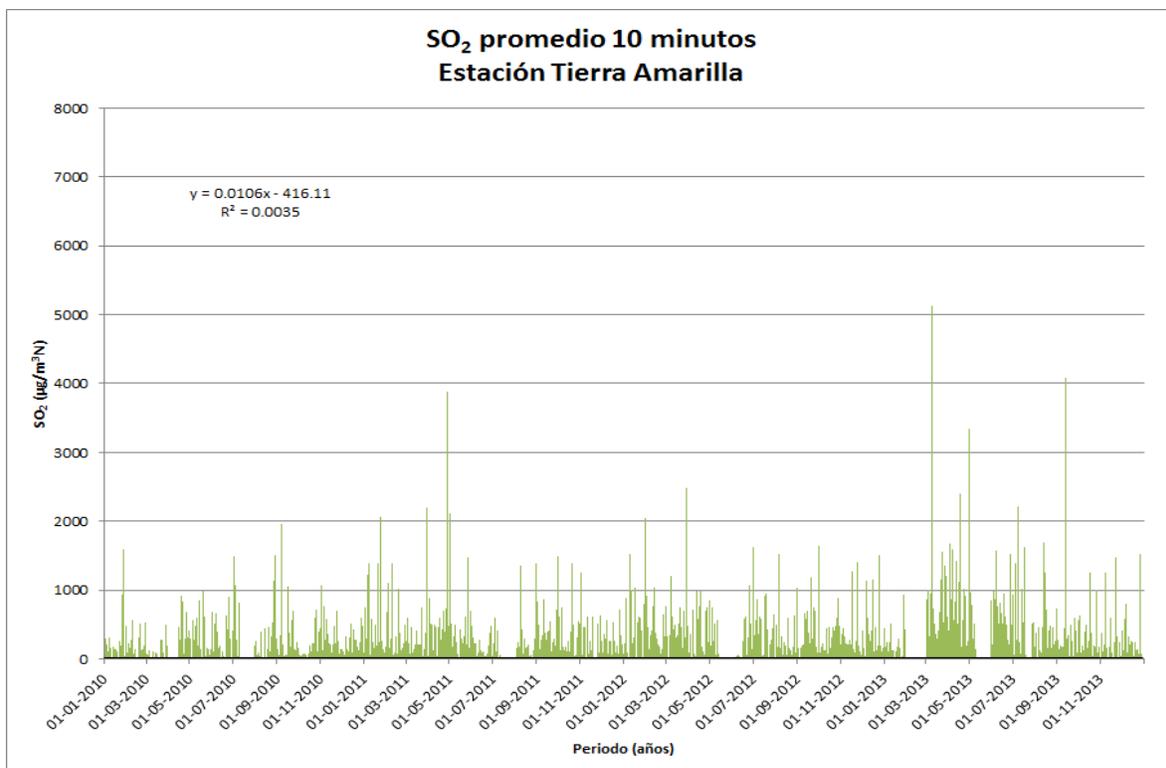
**Figura 27. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Paipote, Paipote**

Las concentraciones en la estación Paipote son superiores a lo observado en las otras estaciones en la zona. Se aprecia que con regularidad las concentraciones horarias superan los 1000 µg/m<sup>3</sup>N. También se observa que hacia el año 2013 las concentraciones muestran un aumento.



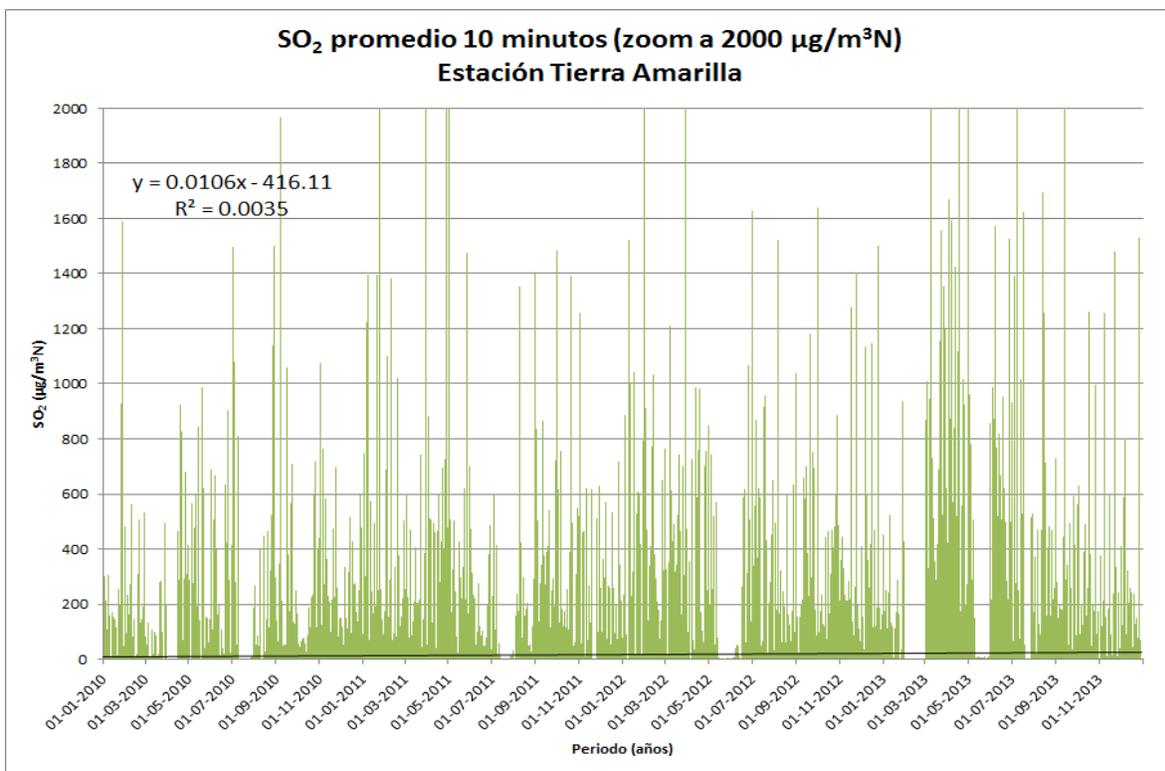
**Figura 28. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Paipote, Paipote, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones en Paipote presentan una tendencia positiva, durante el año 2013 las concentraciones son mayores. Por otra parte, se aprecia que durante la época estival las concentraciones tienden a disminuir, lo que podría indicar la presencia de un ciclo estacional.



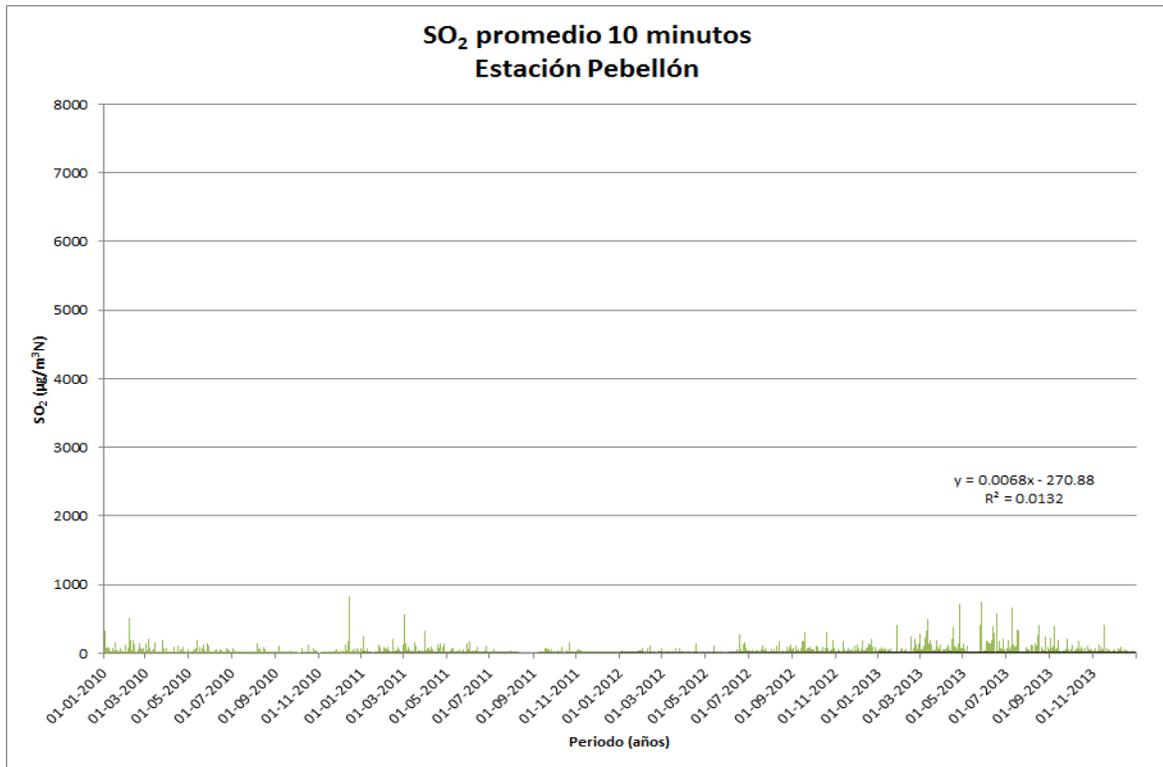
**Figura 29. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla**

En Tierra Amarilla, las concentraciones presentan un comportamiento similar a lo observado en Paipote (ligeramente menores). La ocurrencia de valores extremos altos es menor y concentrada principalmente hacia el final del periodo.



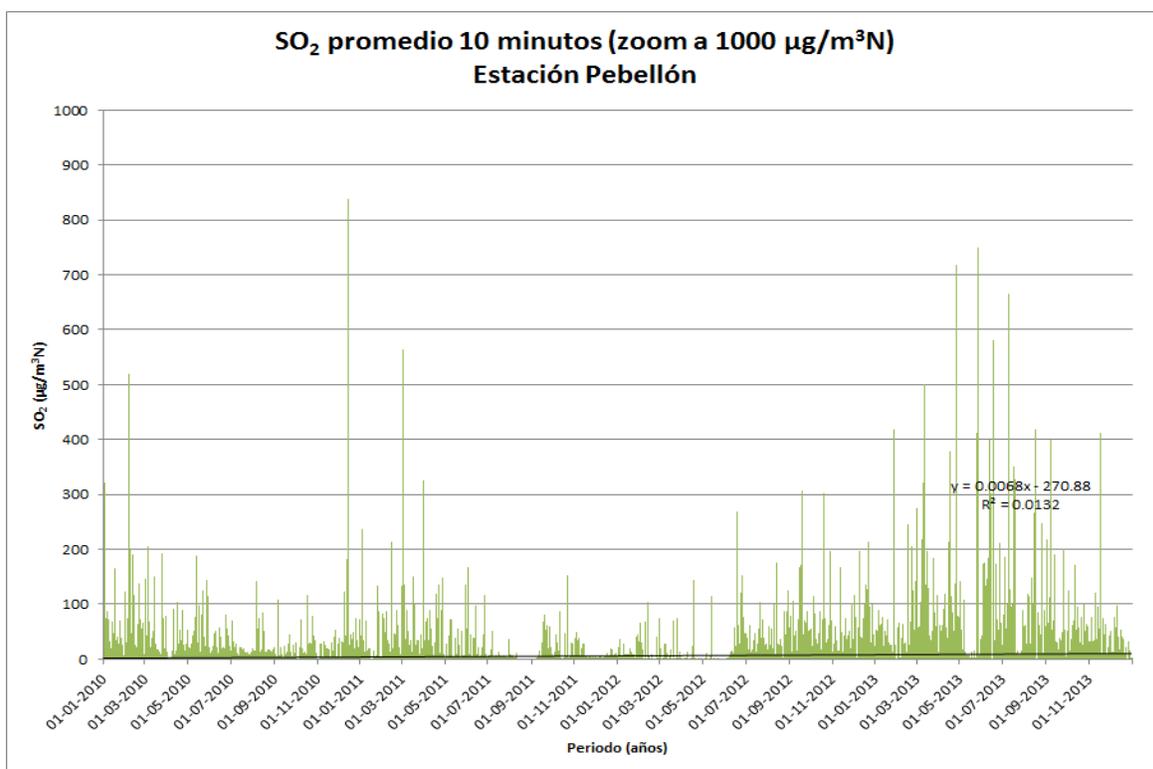
**Figura 30. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Tierra Amarilla, la tendencia lineal muestra un ligero aumento en las concentraciones entre 2010 y 2013. Por otra parte, se aprecia que los aumentos en las concentraciones se producen principalmente en invierno.



**Figura 31. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Pabellón, Tierra Amarilla**

En la estación Pabellón, las concentraciones son bajas y no se aprecia la ocurrencia de valores extremos altos.



**Figura 32. Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Pabellón, Tierra Amarilla, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

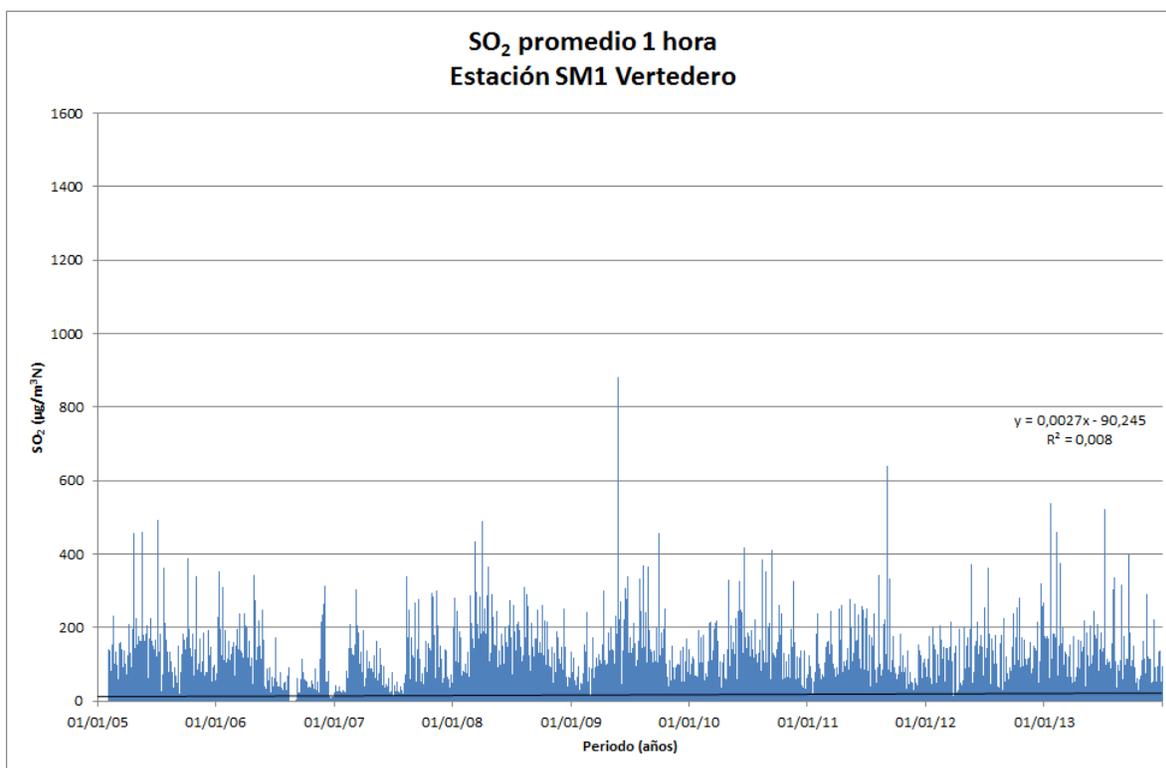
Con el zoom en 1000 µg/m<sup>3</sup>N se puede apreciar que las concentraciones aumentan hacia el año 2013 en Pabellón.

## vi) HUASCO

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a:

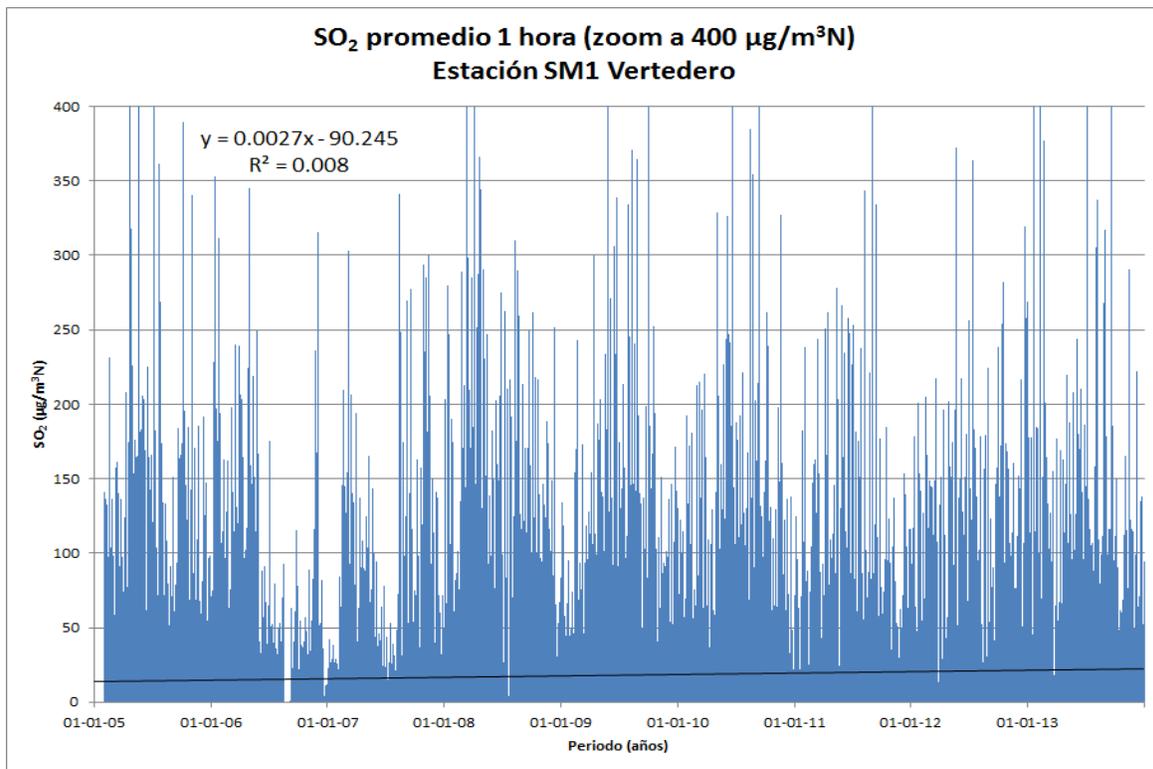
- SM1 - Vertedero
- SM2 - Quinta La Rosa
- SM3 - Segunda Compañía de Bomberos Huasco Bajo
- SM4 - Carretera Km 40
- SM5 - Parcela 5 El Pino
- SM6 - Parcela Buena Esperanza
- SM7 - Los Loros
- SM8 - Freirina
- SM9 - Escuela JM Carrera
- SM10 - Cuerpo de Bomberos EME

Las siguientes figuras muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 1 hora, para el periodo considerado en el estudio.



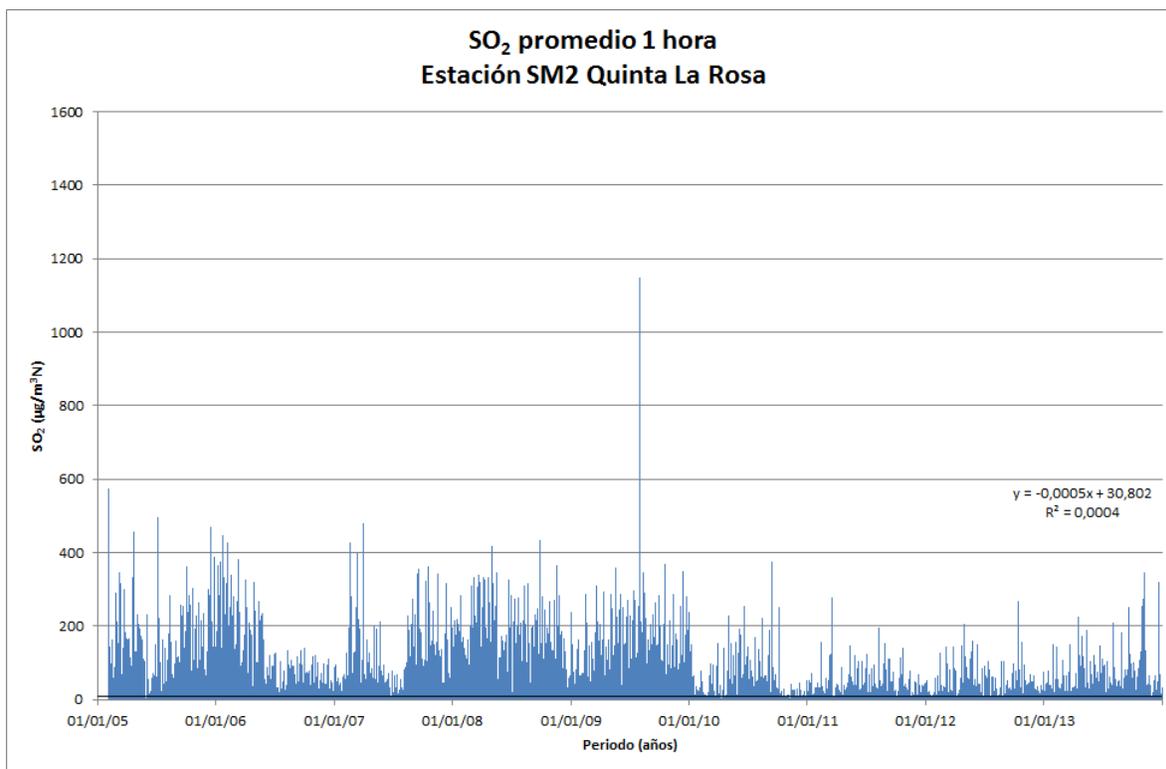
**Figura 33. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM1 Vertedero, Huasco**

En Vertedero, las concentraciones muestran un ciclo estacional, con disminuciones en el periodo estival. La ocurrencia de peaks en esta estación es aislada.



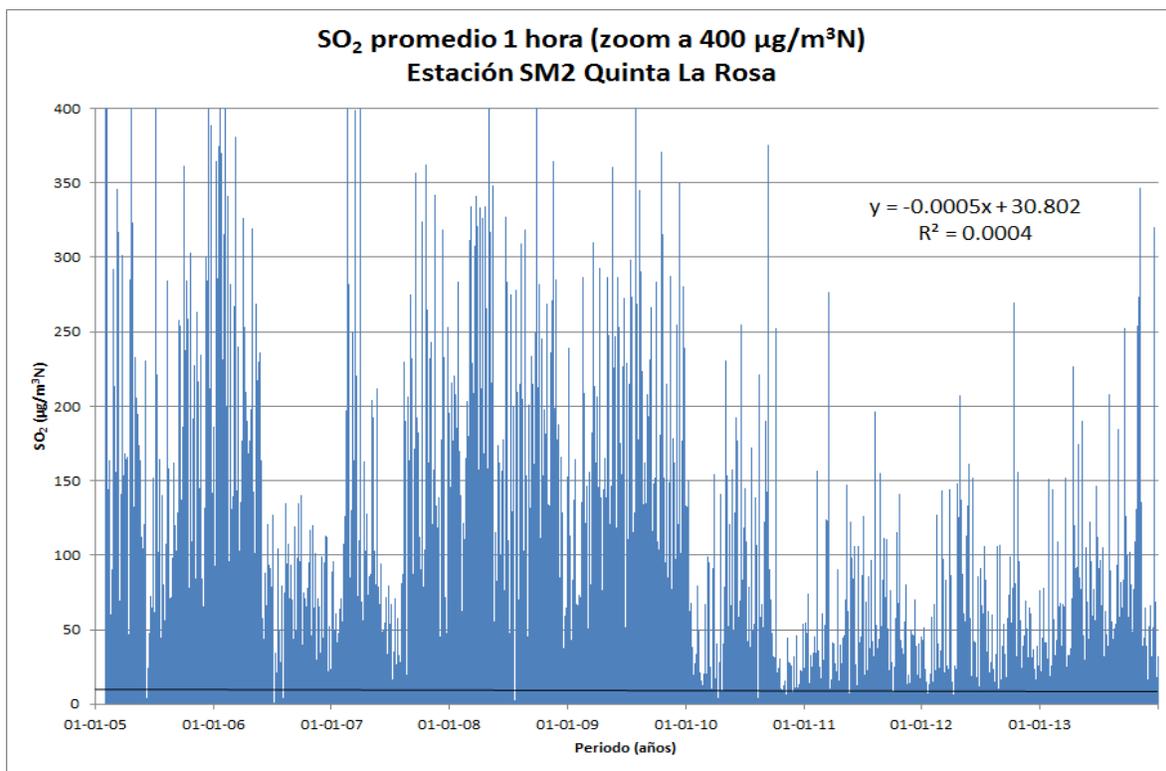
**Figura 34. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM1 Vertedero, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En esta figura se aprecia que las concentraciones en Vertedero están aumentando gradualmente en el tiempo.



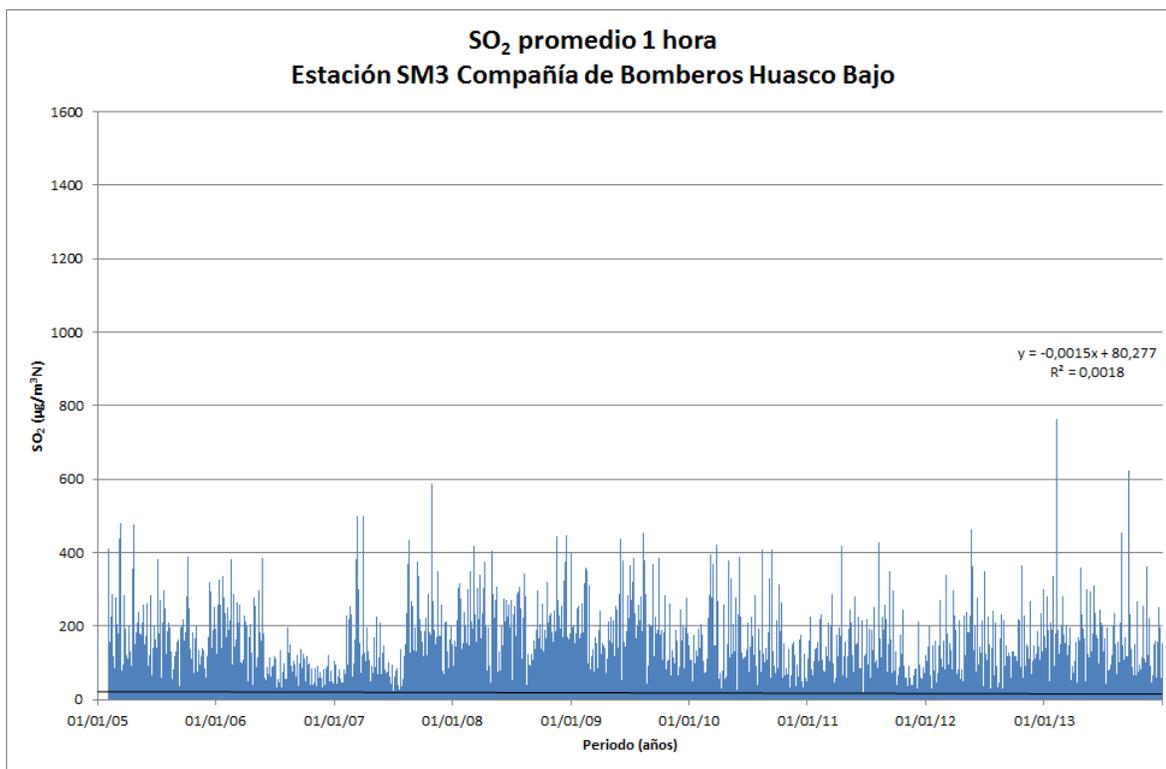
**Figura 35. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM2 Quinta La Rosa , Huasco**

En La Quinta, se aprecia una disminución en las concentraciones a partir del año 2010 y un peak aislado el 29 de julio de 2009 de 1147 µg/m<sup>3</sup>N.



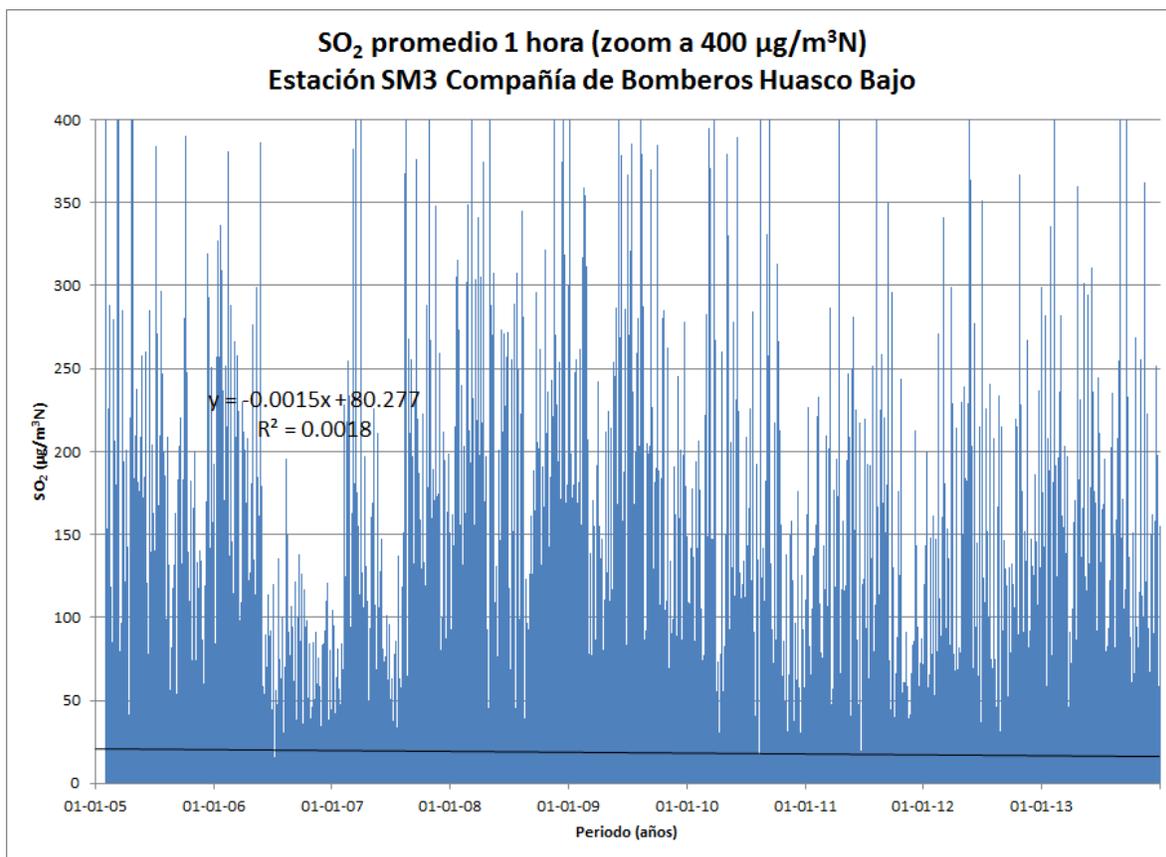
**Figura 36. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM2 Quinta La Rosa , Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En Quinta La Rosa, las concentraciones disminuyeron durante 2011 y 2012, no obstante hacia 2013 se aprecia un aumento. La línea de tendencia muestra una ligera disminución en las concentraciones.



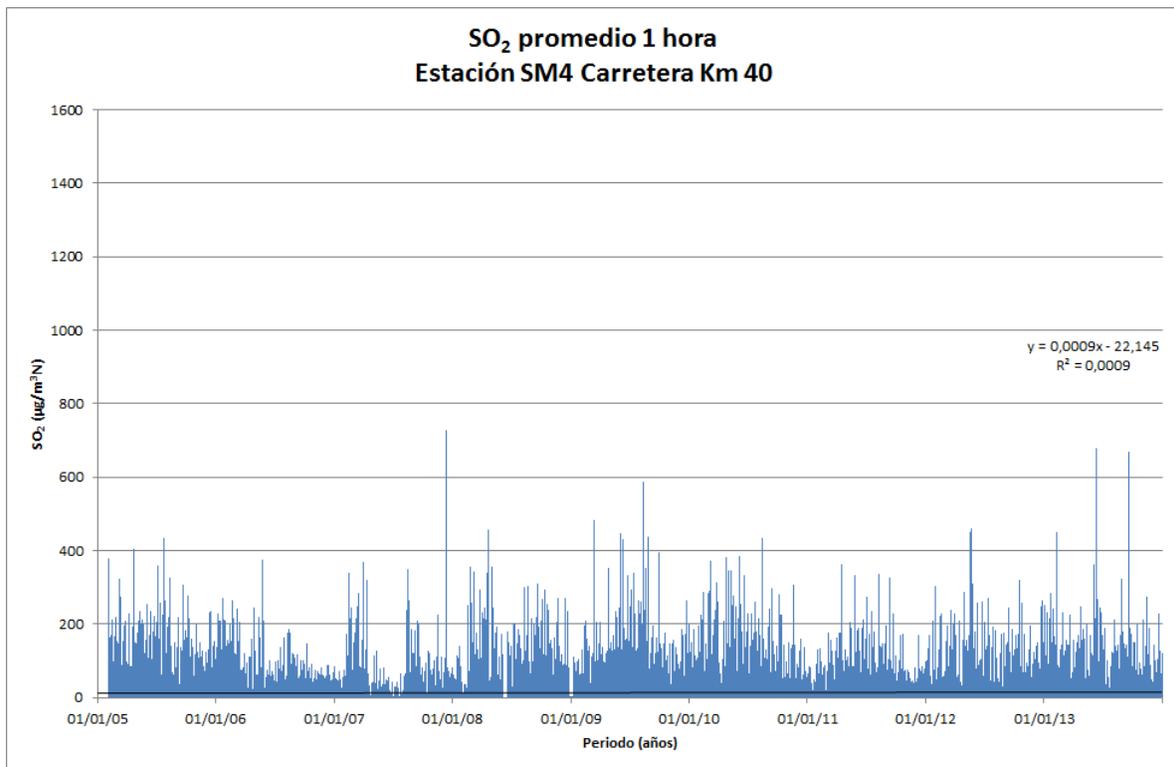
**Figura 37. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco**

En la estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo no se aprecian peaks de concentraciones superiores a 800 µg/m<sup>3</sup>N, la mayor cantidad de los peak alcanza los 400 µg/m<sup>3</sup>N.



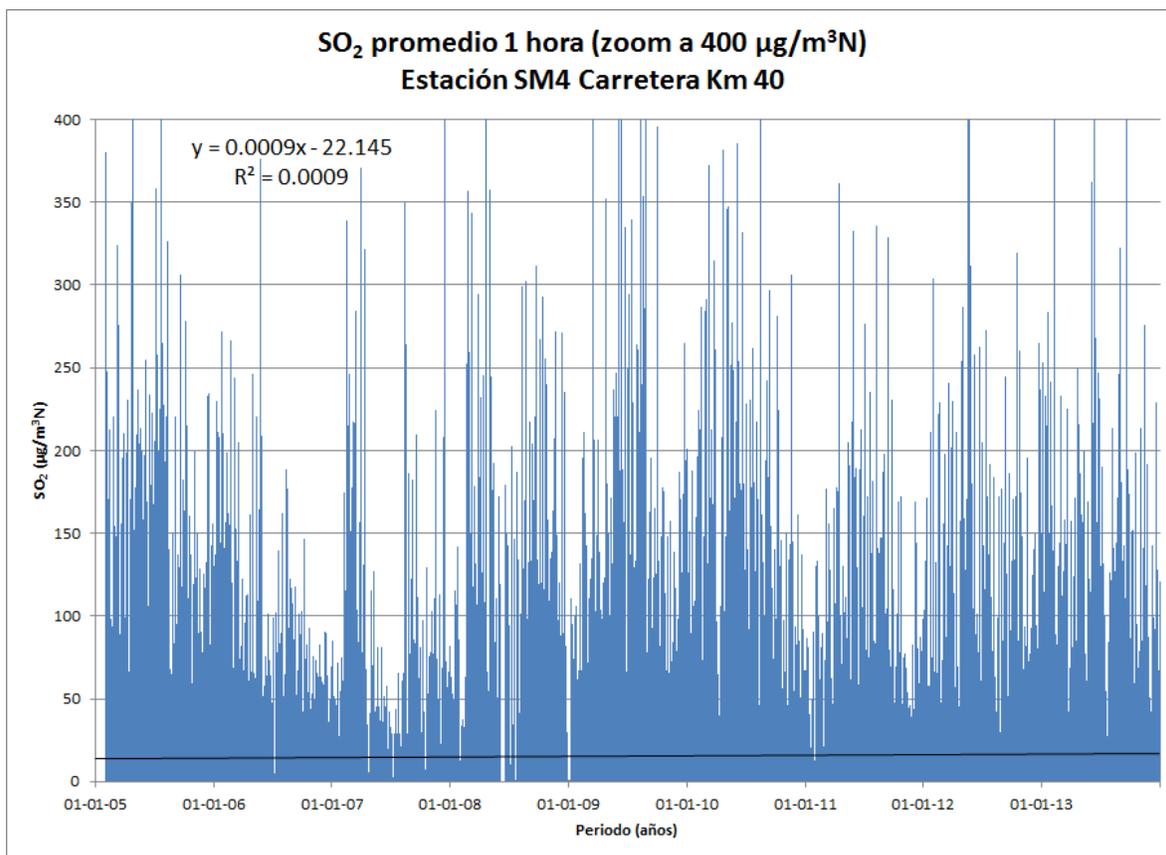
**Figura 38. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Compañía de Bomberos, las concentraciones disminuyeron principalmente durante el último tramo del periodo total considerado (desde año 2008 en adelante). La línea de tendencia muestra una ligera disminución en las concentraciones.



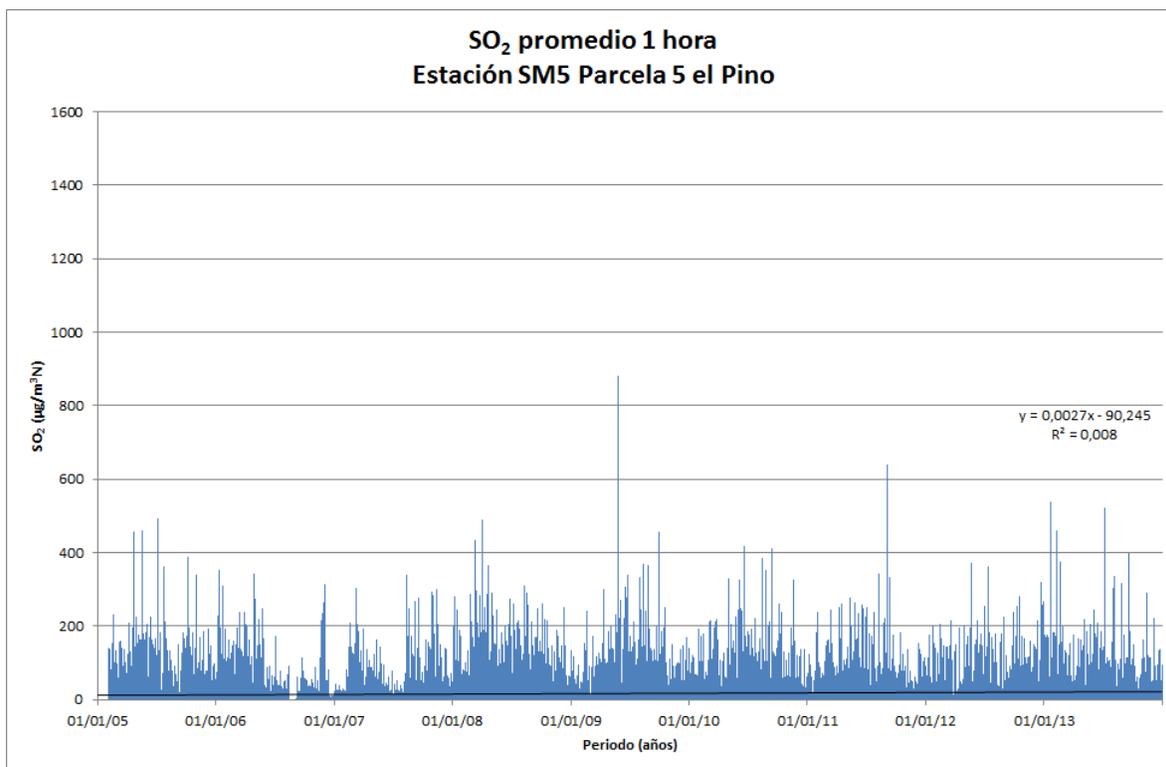
**Figura 39. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM4 Carretera Km 40, Huasco.**

En la estación Carretera km 40 no se aprecian peaks de concentraciones superiores a 800 µg/m<sup>3</sup>N, la mayor cantidad de los peak alcanza los 300 µg/m<sup>3</sup>N.



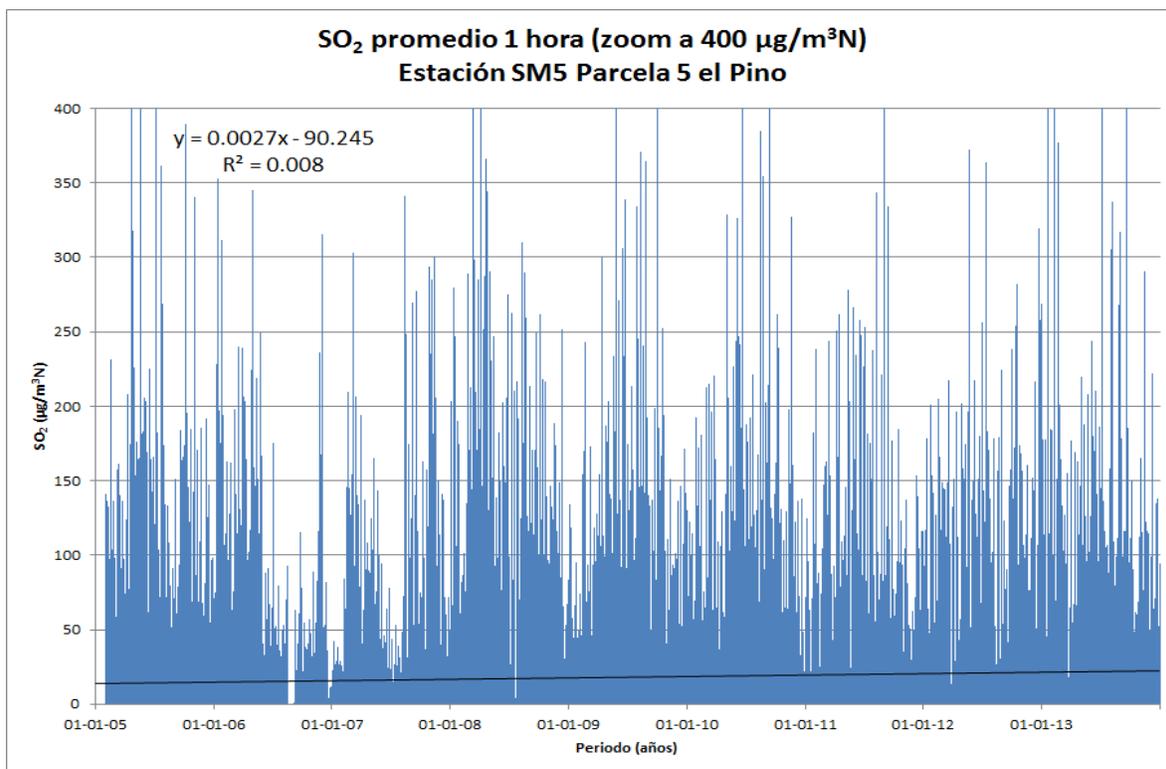
**Figura 40. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM4 Carretera Km 40, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Carretera Km 40, las concentraciones presentan muy poca variación durante el periodo considerado, observándose una mayor densidad de peaks entre los años 2008 y 2010. La línea de tendencia muestra muy poca variación a lo largo del periodo, extrayéndose un aumento sólo numéricamente.



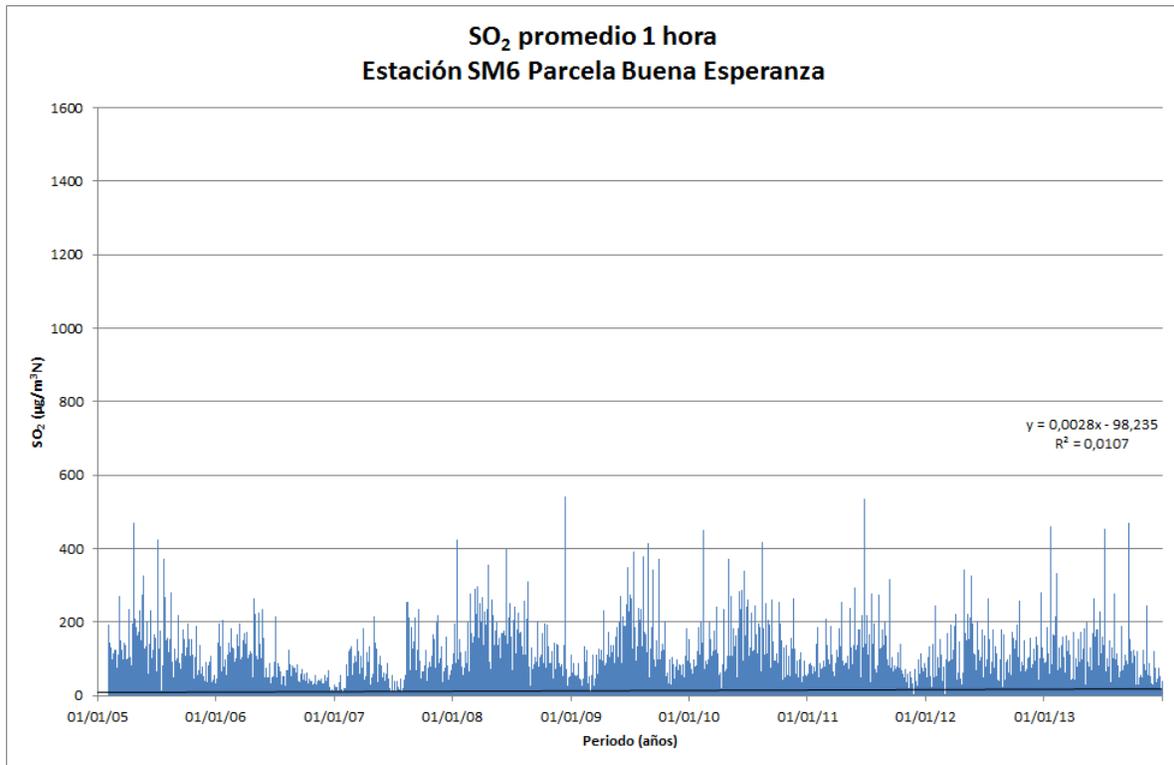
**Figura 41. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM5 Parcela 5 El Pino, Huasco**

En la estación Parcela 5 El Pino, prácticamente no se aprecian peaks de concentraciones superiores a 800 µg/m<sup>3</sup>N, salvo el 26 de mayo de 2009 donde un valor de concentración horaria alcanzó los 880 µg/m<sup>3</sup>N. La mayor cantidad de peaks alcanzan los 400 µg/m<sup>3</sup>N.



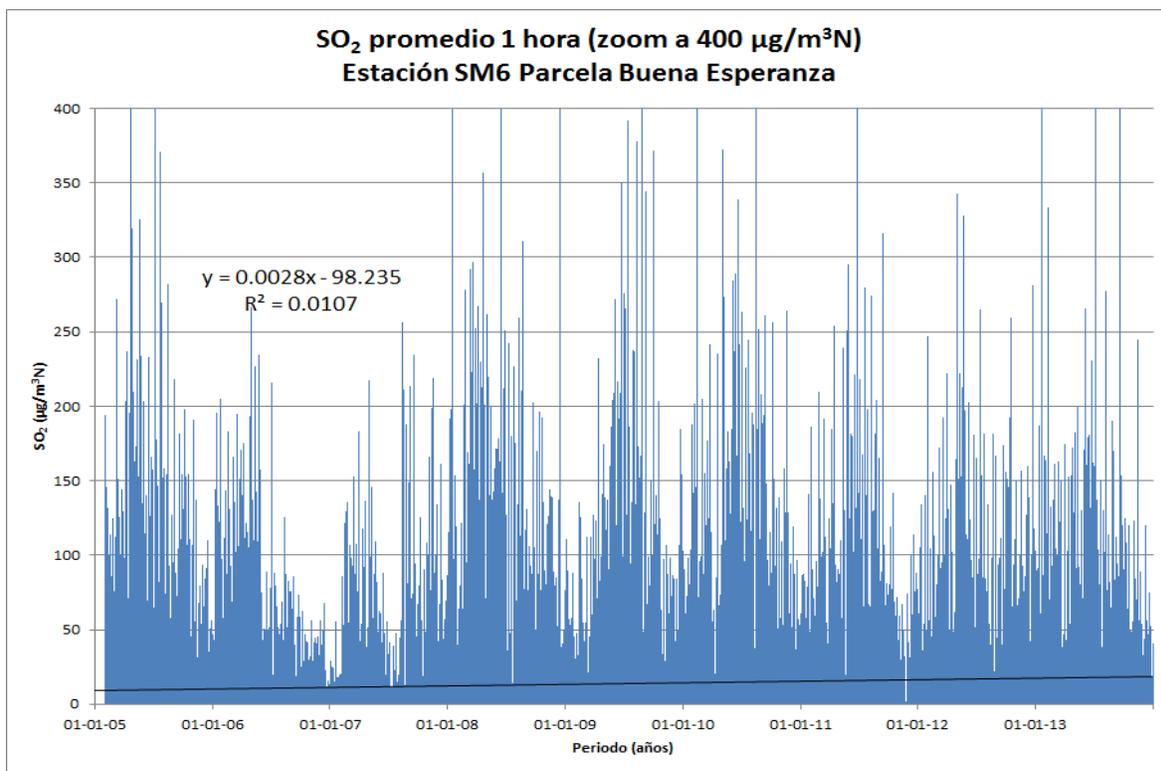
**Figura 42. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM5 Parcela 5 El Pino, Huasco zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la figura se puede apreciar que las concentraciones en SM5 Parcela 5 El Pino están aumentando en el tiempo, mientras que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 150 µg/m<sup>3</sup>N.



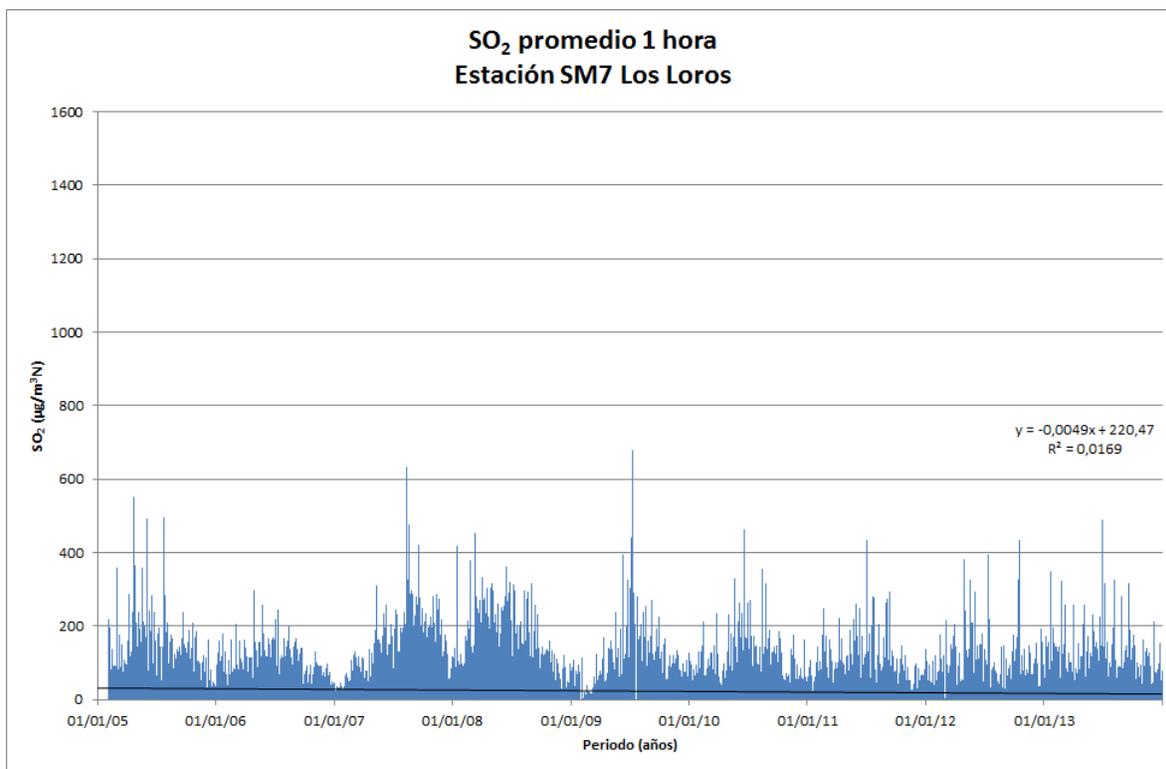
**Figura 43. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM6 Parcela Buena Esperanza, Huasco**

En Parcela Buena Esperanza no se observan peaks superiores a 600 µg/m<sup>3</sup>N, en general, las cocentraciones se presentan bajo los 200 µg/m<sup>3</sup>N.



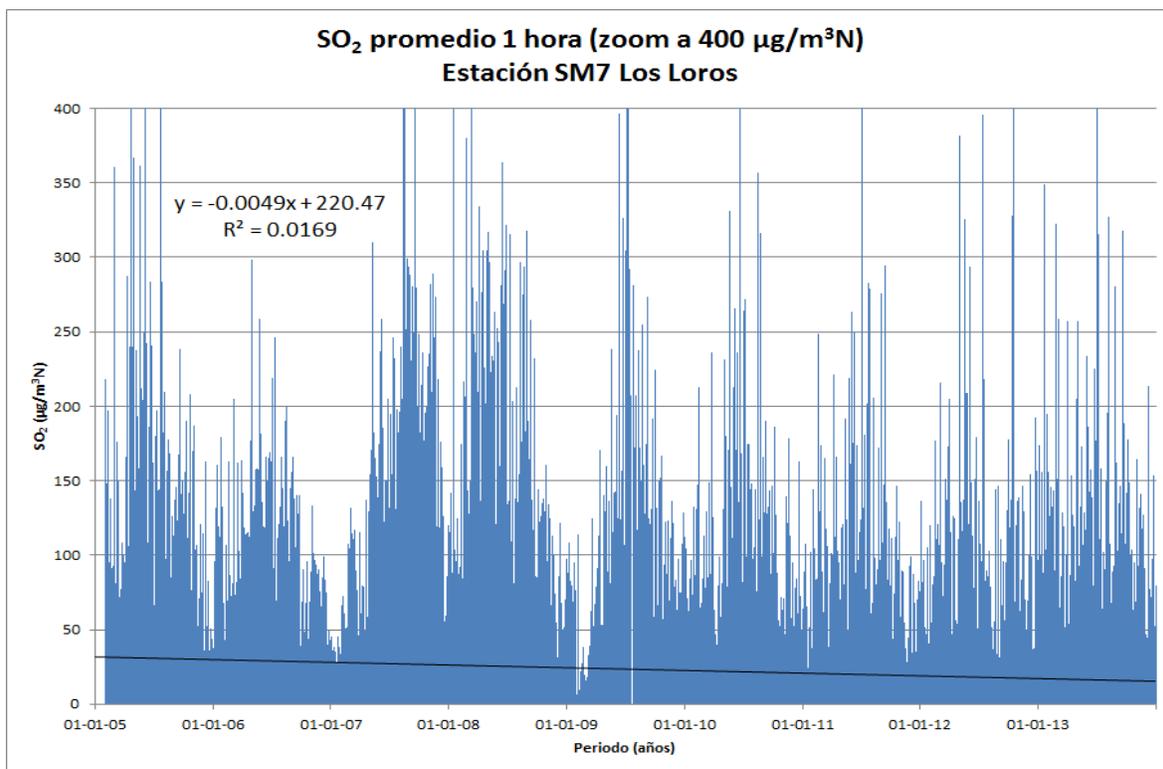
**Figura 44. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM6 Parcela Buena Esperanza, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la figura con zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N se puede apreciar una tendencia positiva en las concentraciones, entre 2005 y 2013.



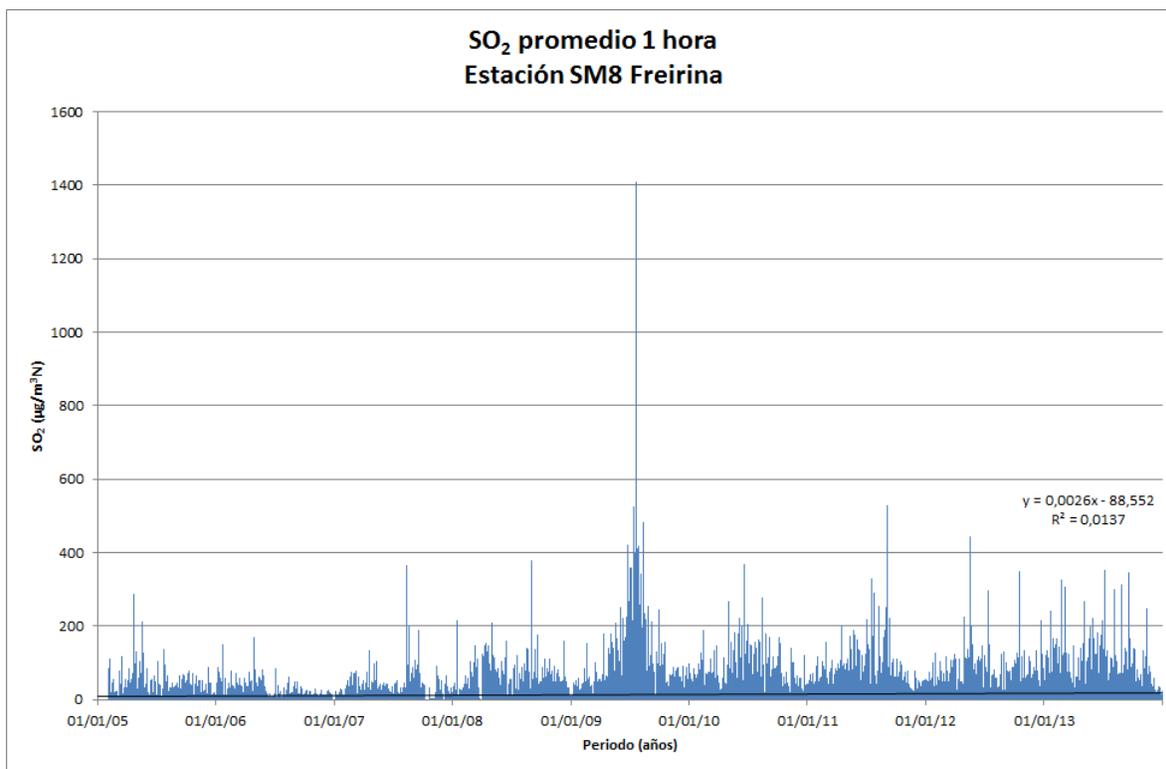
**Figura 45. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM7 Los Loros, Huasco**

El comportamiento de la estación Los Loros, es similar a lo observado en Parcela Buena Esperanza, las concentraciones en general no superan los 200 µg/m<sup>3</sup>N, salvo algunos peaks de concentraciones. Se aprecia además, un ciclo estacional, con mayores concentraciones en la época invernal.



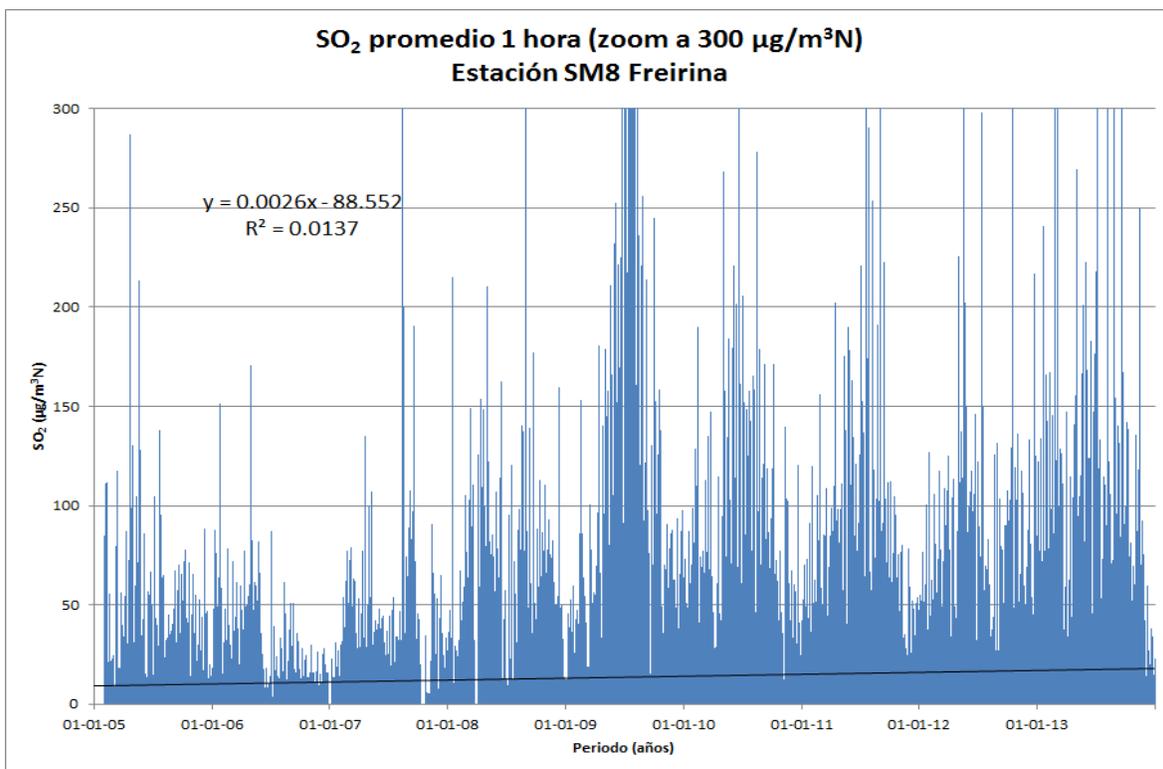
**Figura 46. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM7 Los Loros, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar el zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N, se aprecia que las concentraciones presenta una disminución en el periodo. Se aprecia con mayor claridad, que durante el invierno las concentraciones aumentan y durante verano disminuyen.



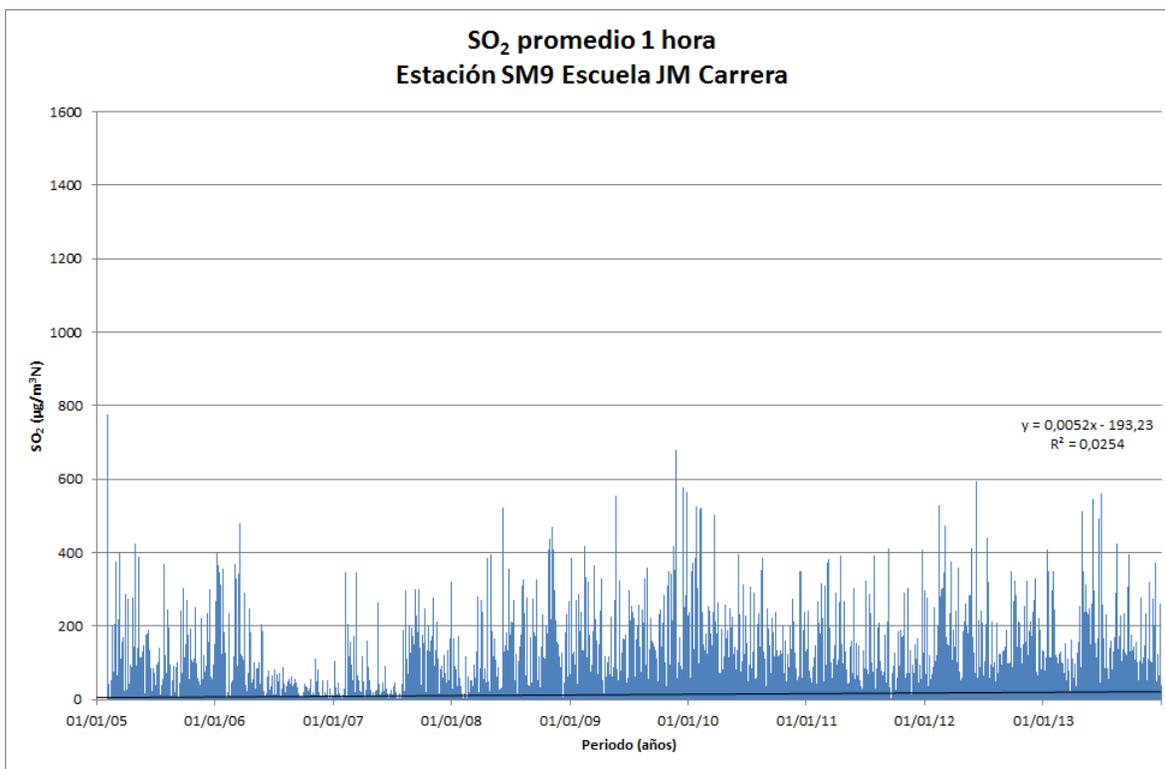
**Figura 47. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM8 Freirina, Huasco**

Las concentraciones son bajas, en general menores a 100 µg/m<sup>3</sup>N. Durante el julio del año 2009 se produjo un episodio de altas concentraciones, las que alcanzaron un peak horario de 1410 µg/m<sup>3</sup>N, este evento es aislado en el periodo estudiado. Entre 2011 y 2013 se aprecia un aumento en la ocurrencia de peaks de concentraciones, sin embargo, de menor magnitud.



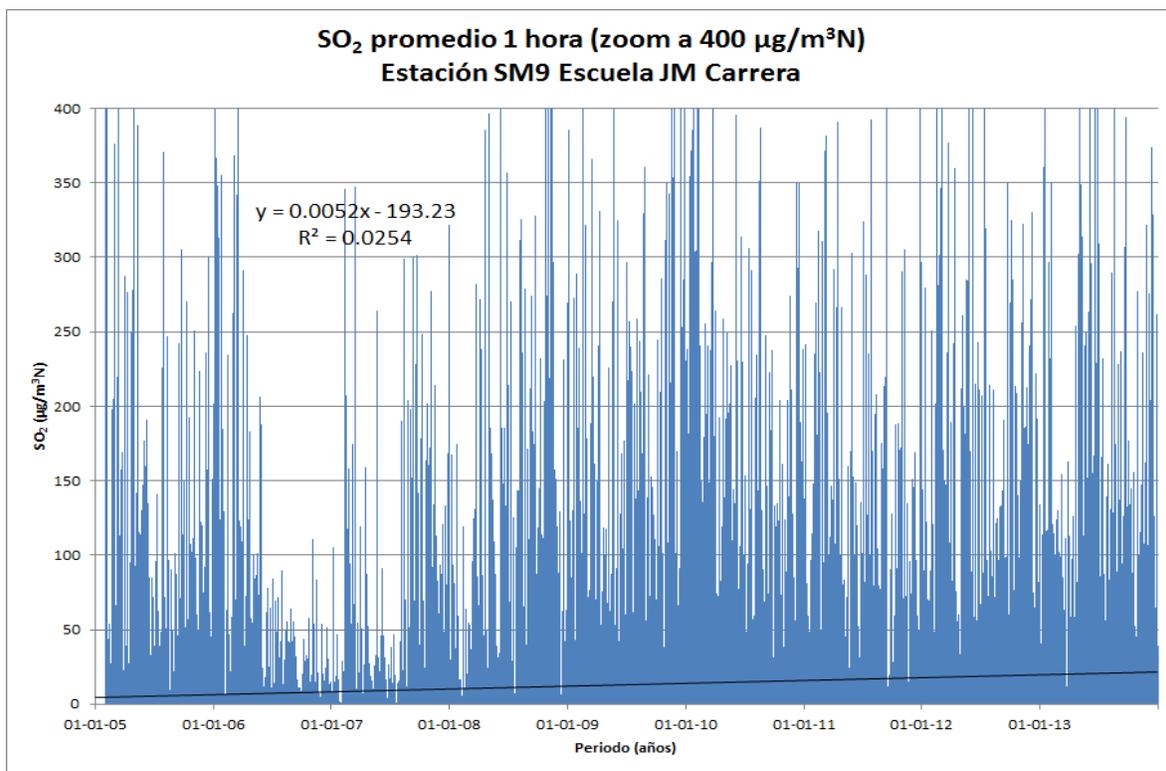
**Figura 48. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM8 Freirina, Huasco, zoom a 300 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la figura con zoom a 300 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar un aumento en las concentraciones hacia los últimos años de estudio. Durante 2013 se aprecia una mayor ocurrencia de valores relativos altos.



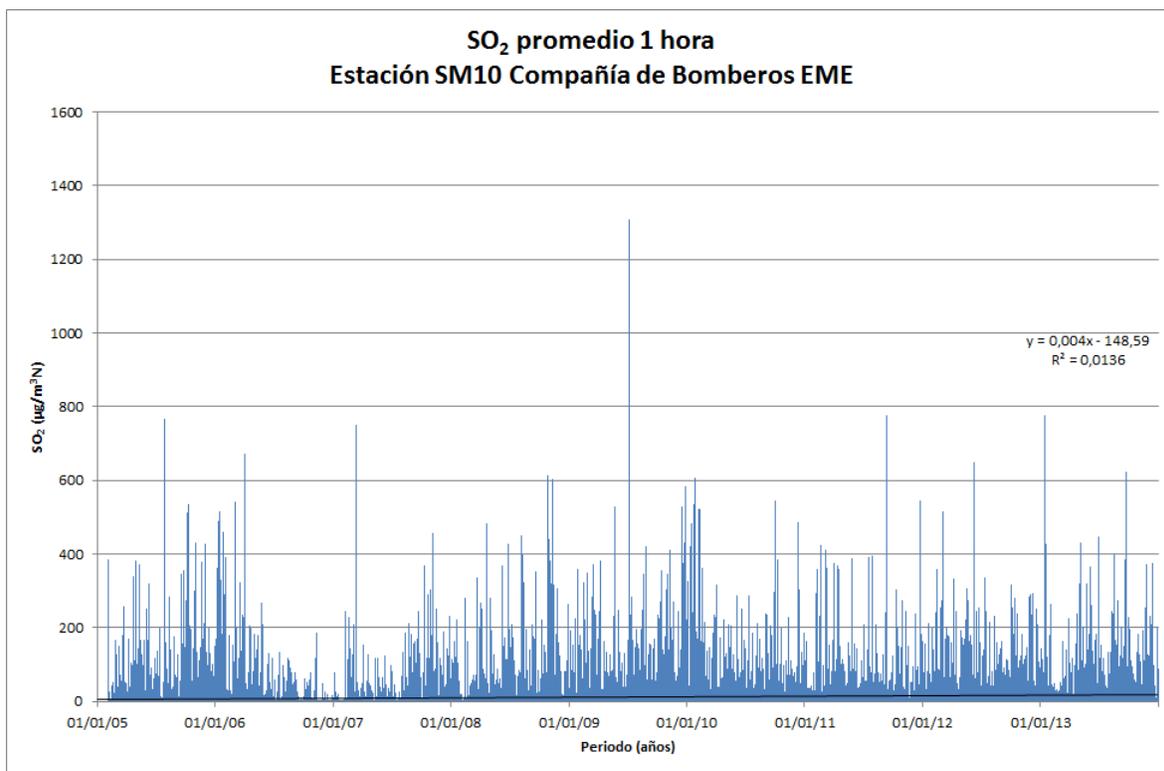
**Figura 49. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco**

En la estación Escuela JM Carrera, las concentraciones superan con frecuencia los 200 o 300 µg/m<sup>3</sup>N. Los mayores peaks de concentración se observan alrededor de los 600 µg/m<sup>3</sup>N.



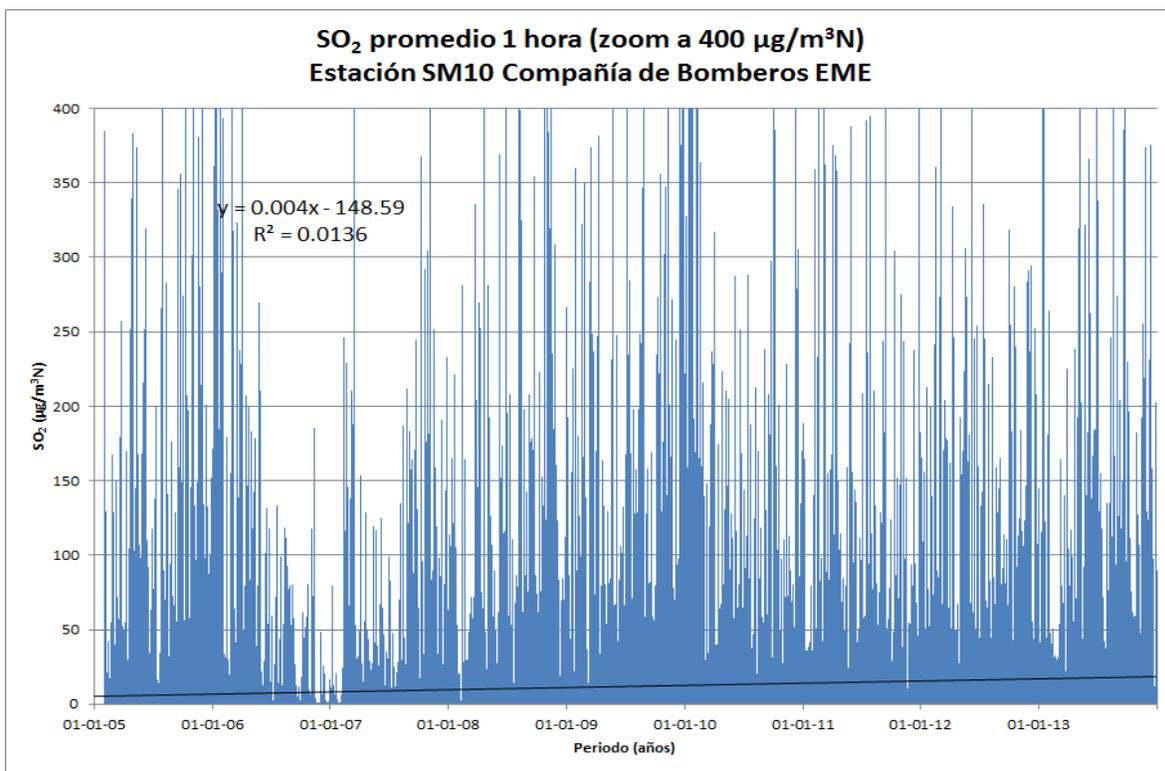
**Figura 50. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

La curva de tendencia lineal muestra que las concentraciones en Escuela JM Carrera presentan un aumento gradual en el tiempo, entre los años 2005 y 2013.



**Figura 51. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM10 Compañía de Bomberos EME, Huasco**

En la estación Compañía de Bomberos EME, se observa la ocurrencia de peaks de concentraciones entre 400 y 800 µg/m<sup>3</sup>N y un peak de 1309 µg/m<sup>3</sup>N, producido el día 04 de julio de 2009.

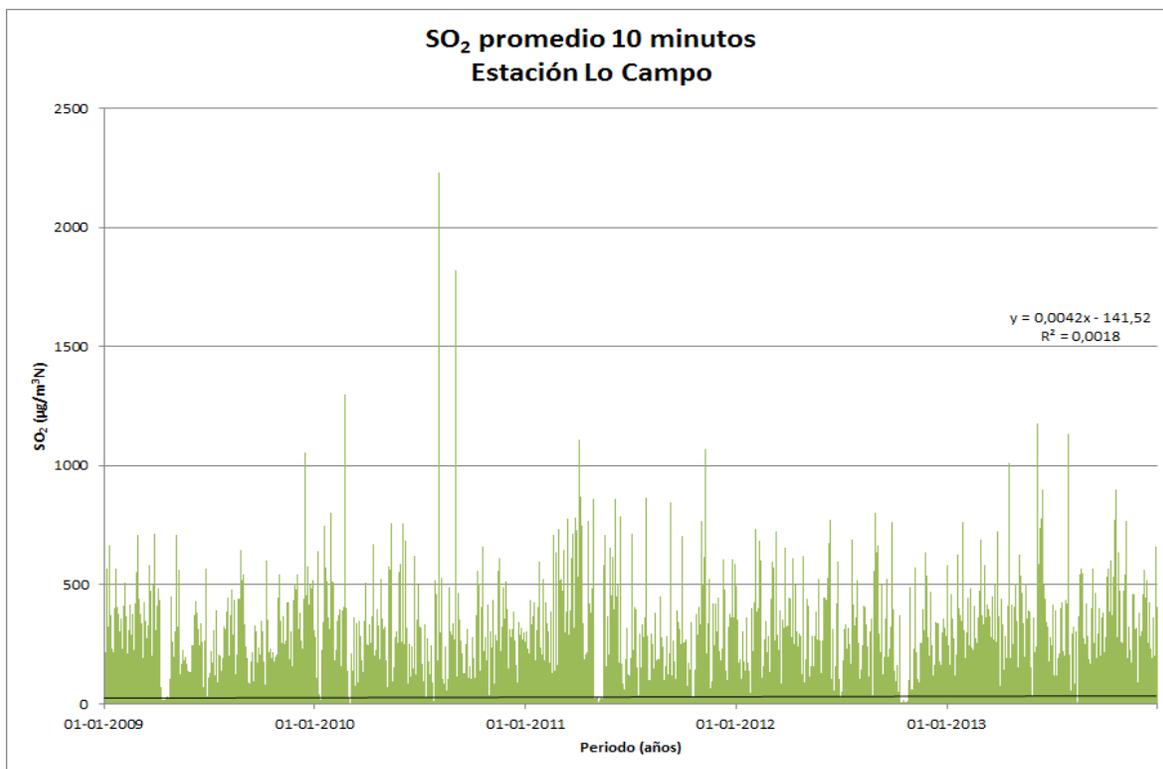


**Figura 52. Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación SM10 Compañía de Bomberos EME, Huasco, zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N.**

Observando las concentraciones en Compañía de Bomberos EME con un zoom a 400 µg/m<sup>3</sup>N, se puede observar que presentan una tendencia positiva.

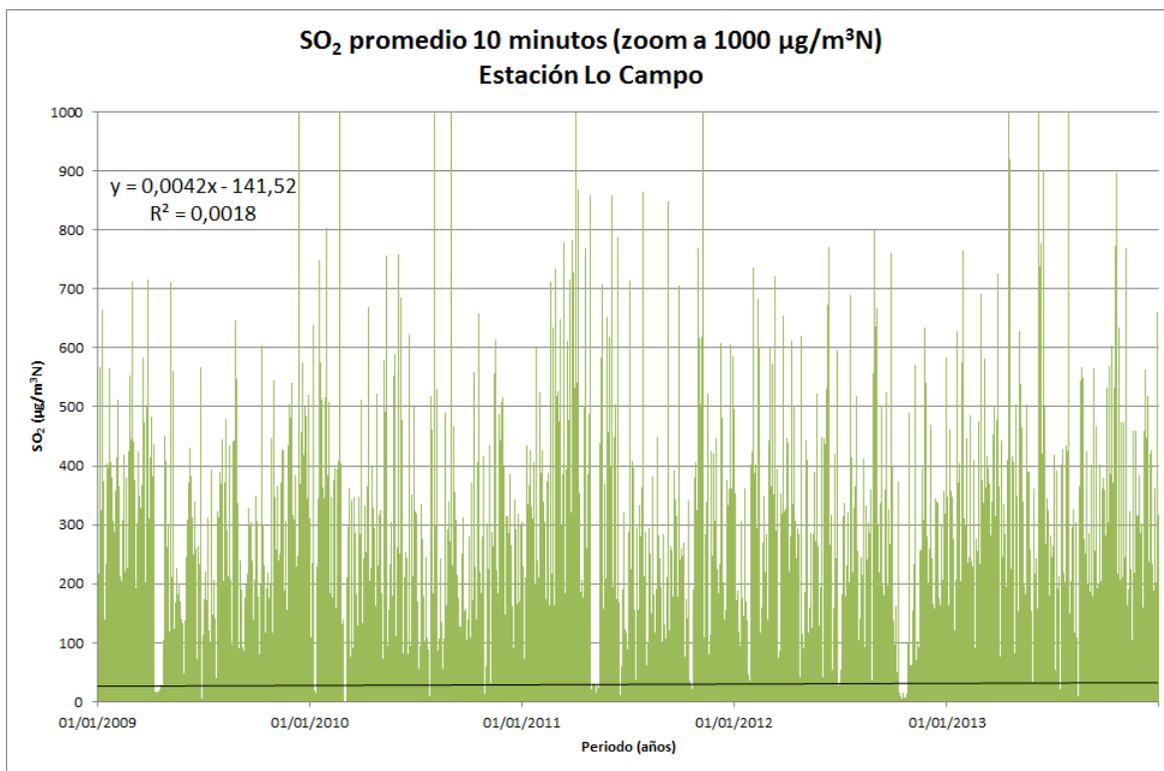
### vii) CATEMU – LLAY LLAY

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Lo Campo, Santa Margarita, Catemu y Romeral. Las figuras siguientes muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio.



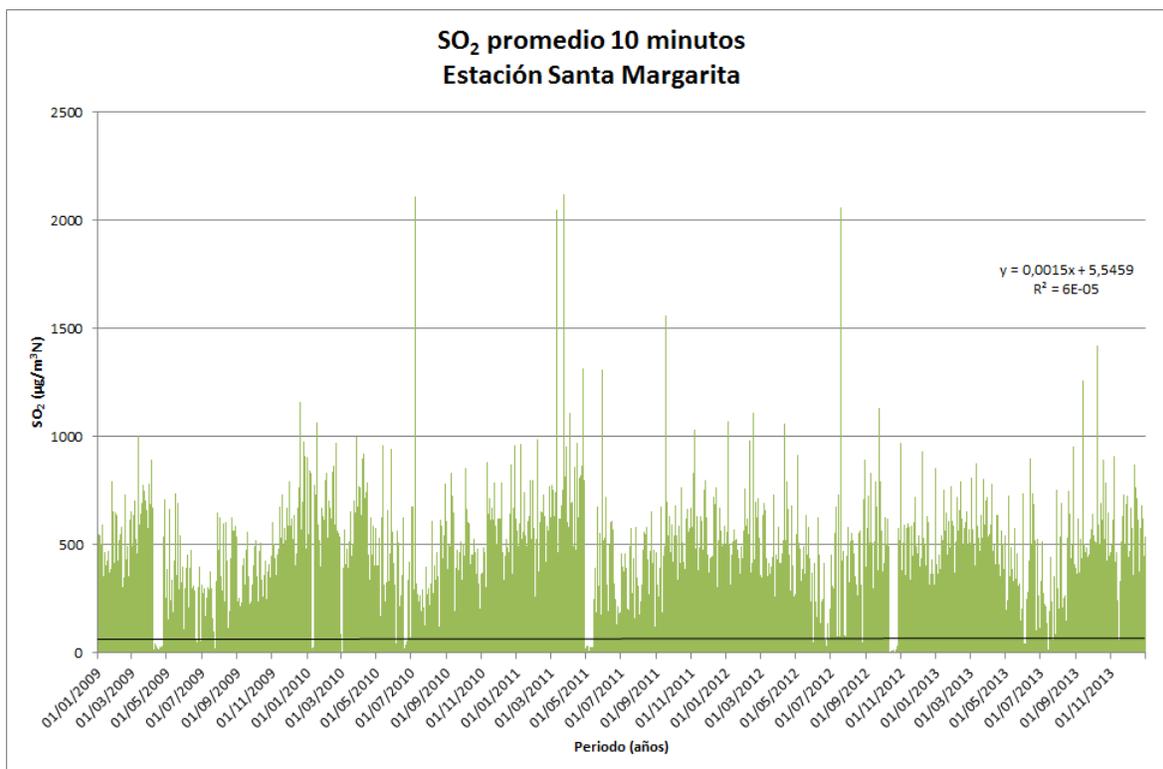
**Figura 53 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lo Campo, Catemu – Llay Llay.**

En la estación Lo Campo, se aprecia que las concentraciones presentan valores en torno a los 500 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores altos, superiores a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N y prácticamente sólo un caso aislado con valor superior a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.



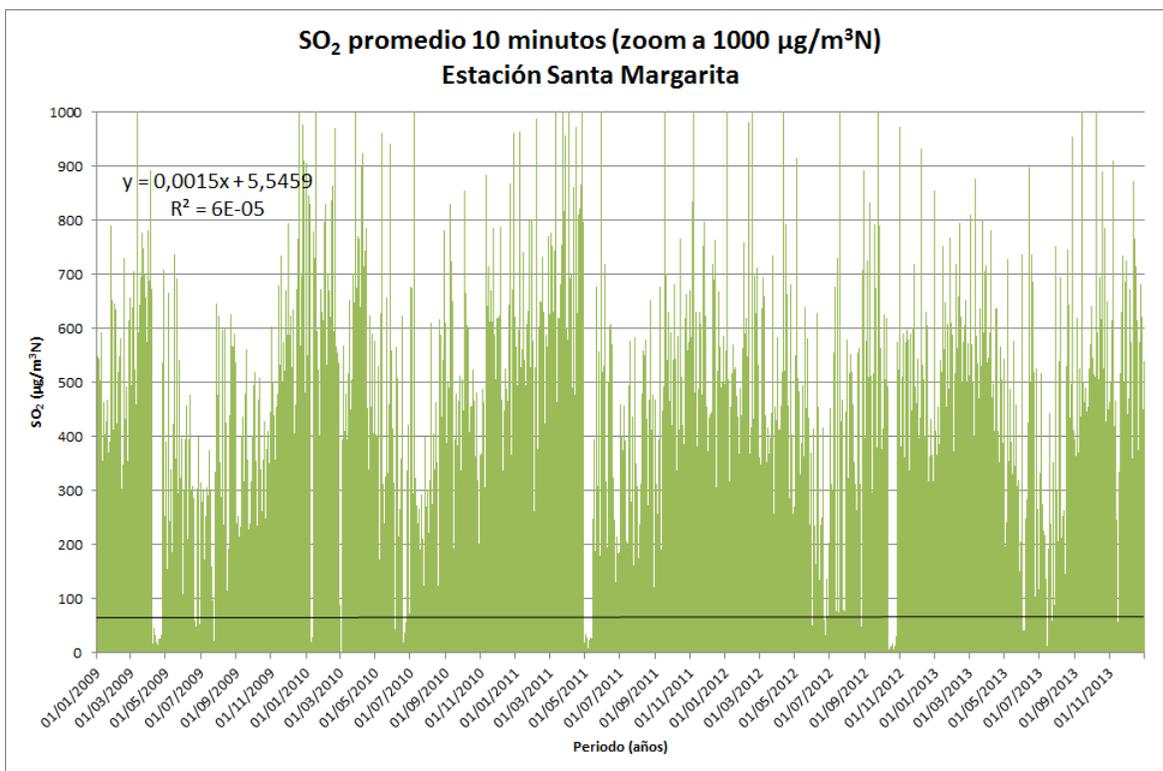
**Figura 54 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lo Campo, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Lo Campo, la tendencia lineal muestra un ligero aumento en las concentraciones entre 2009 y 2013. Desde el año 2011 se observa un mayor número de alzas que superan los 700 µg/m<sup>3</sup>N.



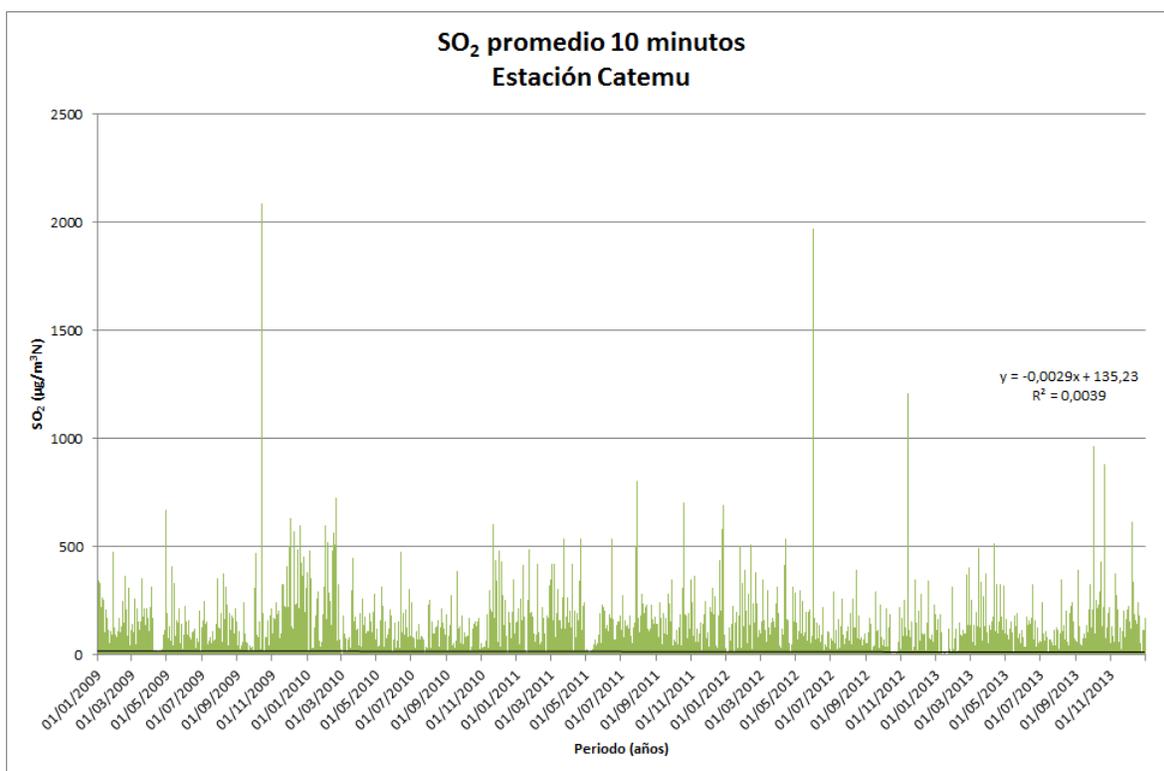
**Figura 55 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay.**

En la estación Santa Margarita, se aprecia que las concentraciones presentan valores en torno a los 500 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores altos, superiores a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N y cuatro valores superiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.



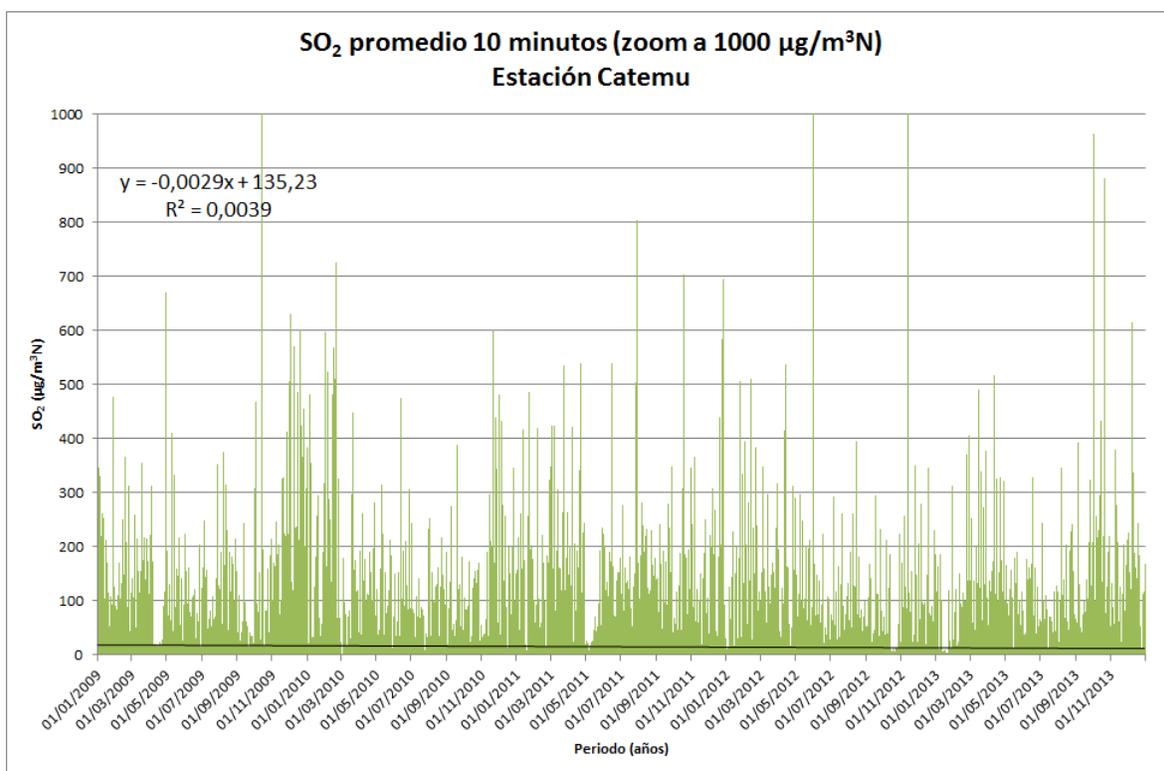
**Figura 56 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Santa Margarita, la tendencia lineal no muestra un aumento claro en las concentraciones entre 2009 y 2013, aunque sí numéricamente (en la ecuación). Es posible distinguir una mayor densidad de peacks en periodos estivales.



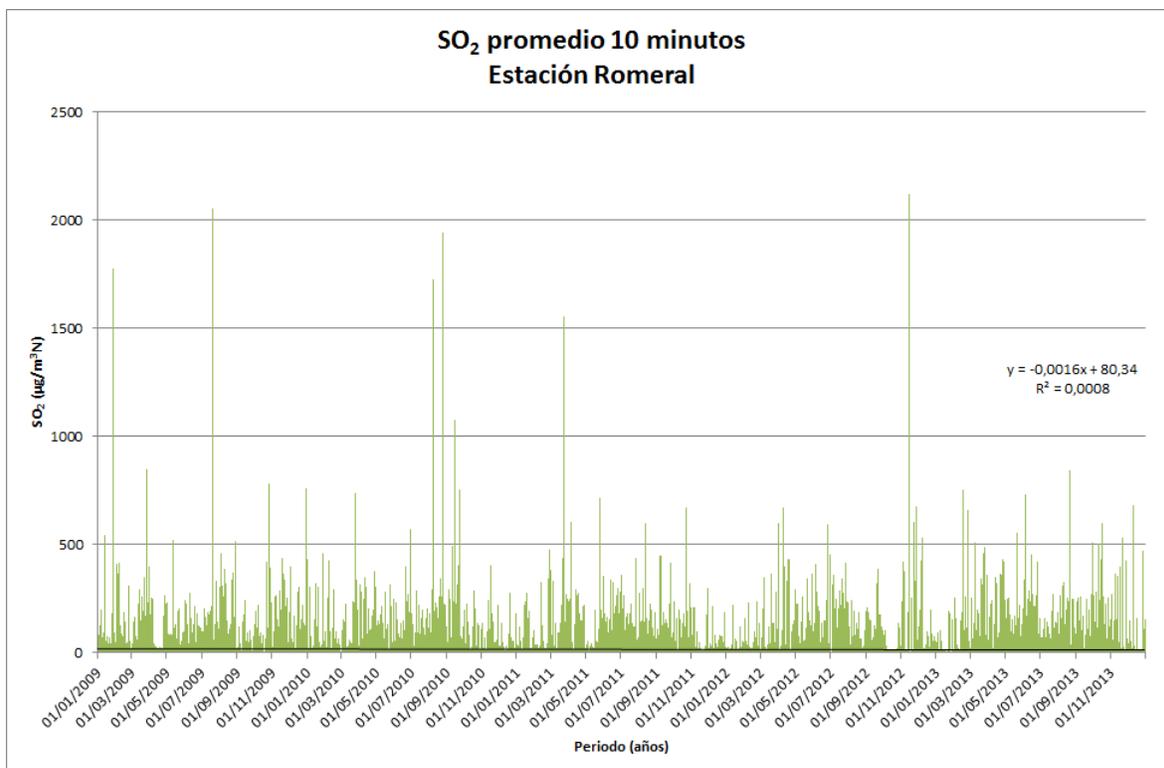
**Figura 57 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Catemu, Catemu – Llay Llay.**

En la estación Catemu, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores menores a los 500 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores superiores a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N y un sólo valor superior a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.



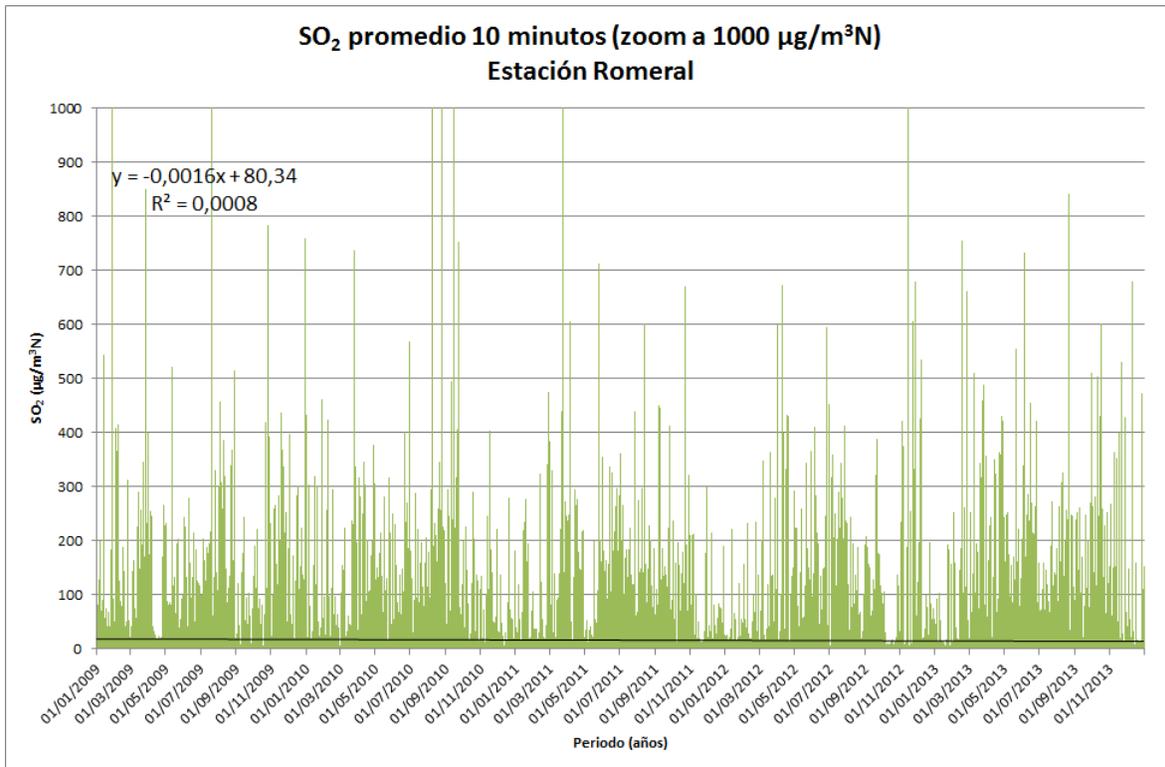
**Figura 58 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Catemu, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Catemu, la tendencia lineal no muestra una disminución clara en las concentraciones entre 2009 y 2013, aunque sí numéricamente (en la ecuación). Es posible distinguir una mayor densidad de peacks en periodos estivales.



**Figura 59 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Romeral, Catemu – Llay Llay.**

En la estación Romeral, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores en torno a los 500 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores superiores a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N y sólo dos valores superiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.

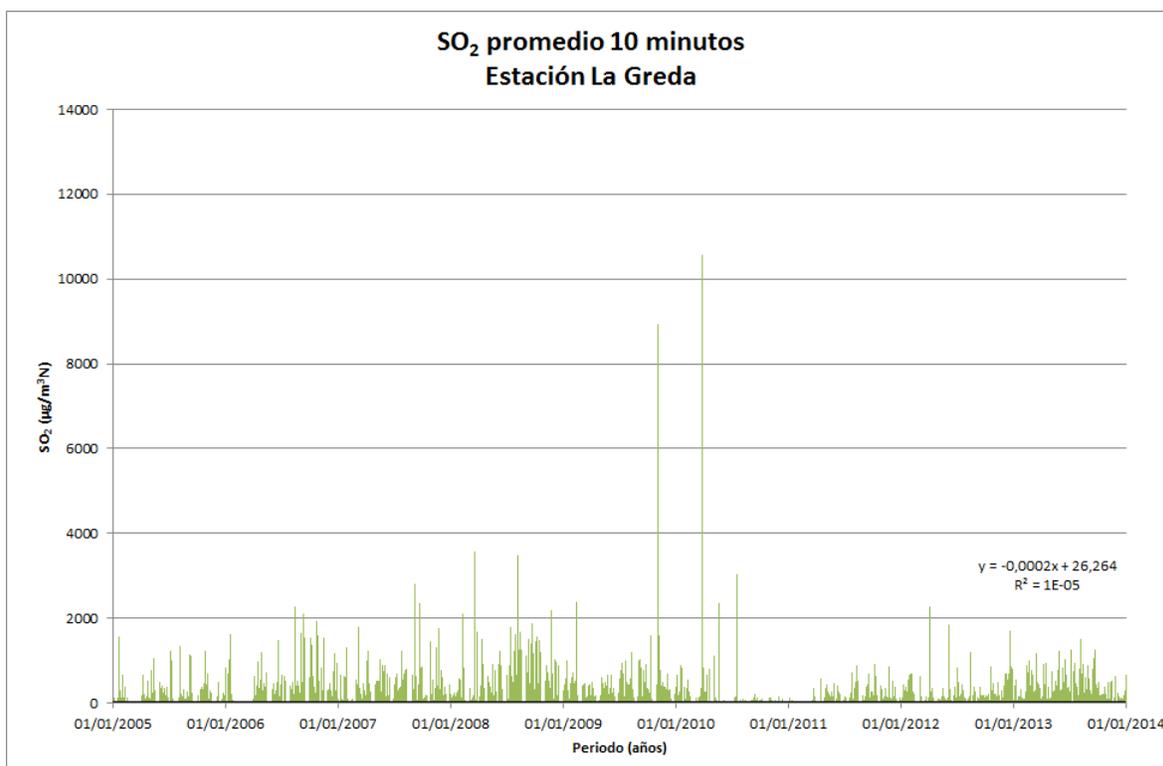


**Figura 60 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Romeral, Catemu – Llay Llay, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 1000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones.

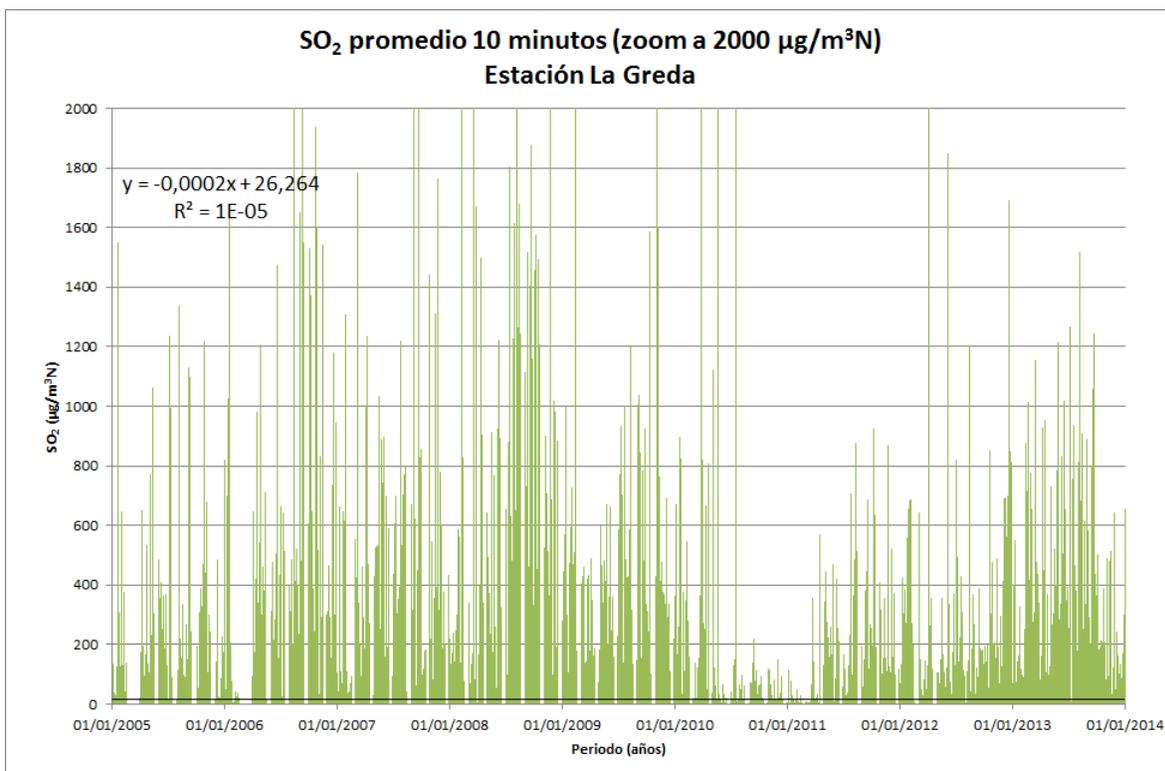
### viii) QUINTERO - PUCHUNCAVÍ

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a La Greda, Los Maitenes, Puchuncaví, Sur, Valle Alegre, Ventanas y Quintero. A continuación, las figuras muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio. GNL Quintero presenta concentraciones horarias.



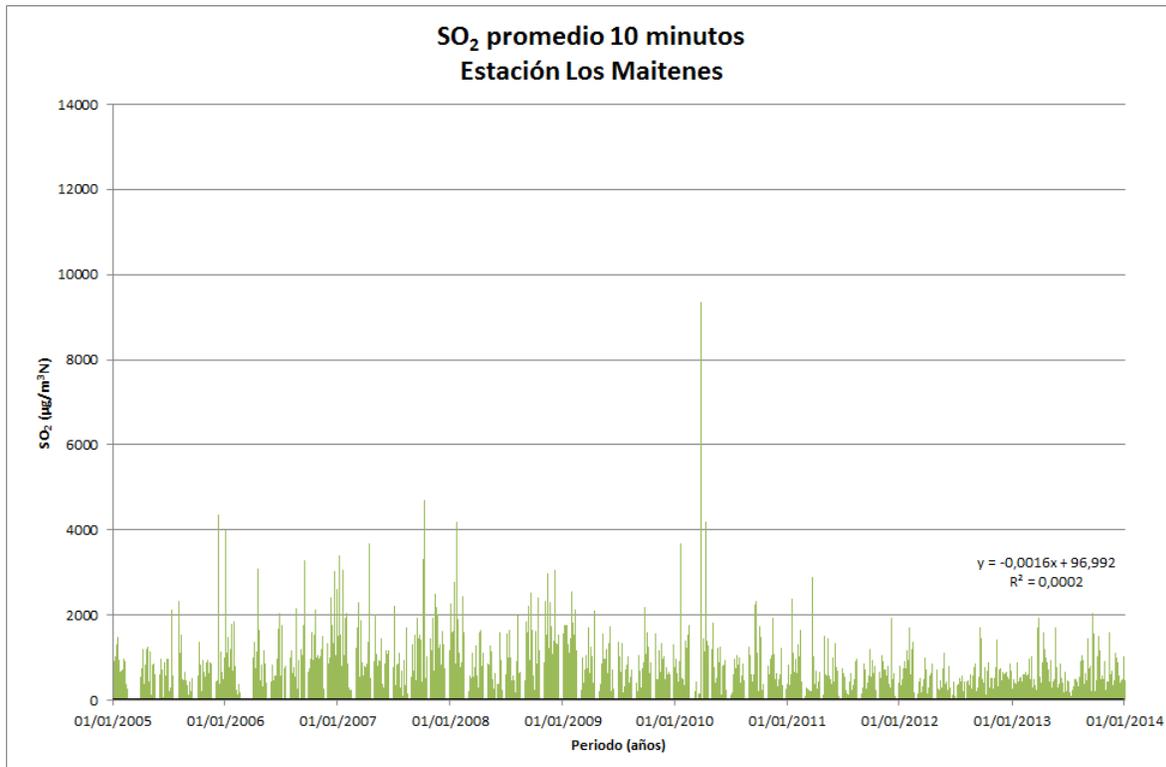
**Figura 61 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación La Greda, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación La Greda, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores en torno a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores superiores a los 2000 µg/m<sup>3</sup>N y dos valores extremos que superan los 8000 µg/m<sup>3</sup>N.



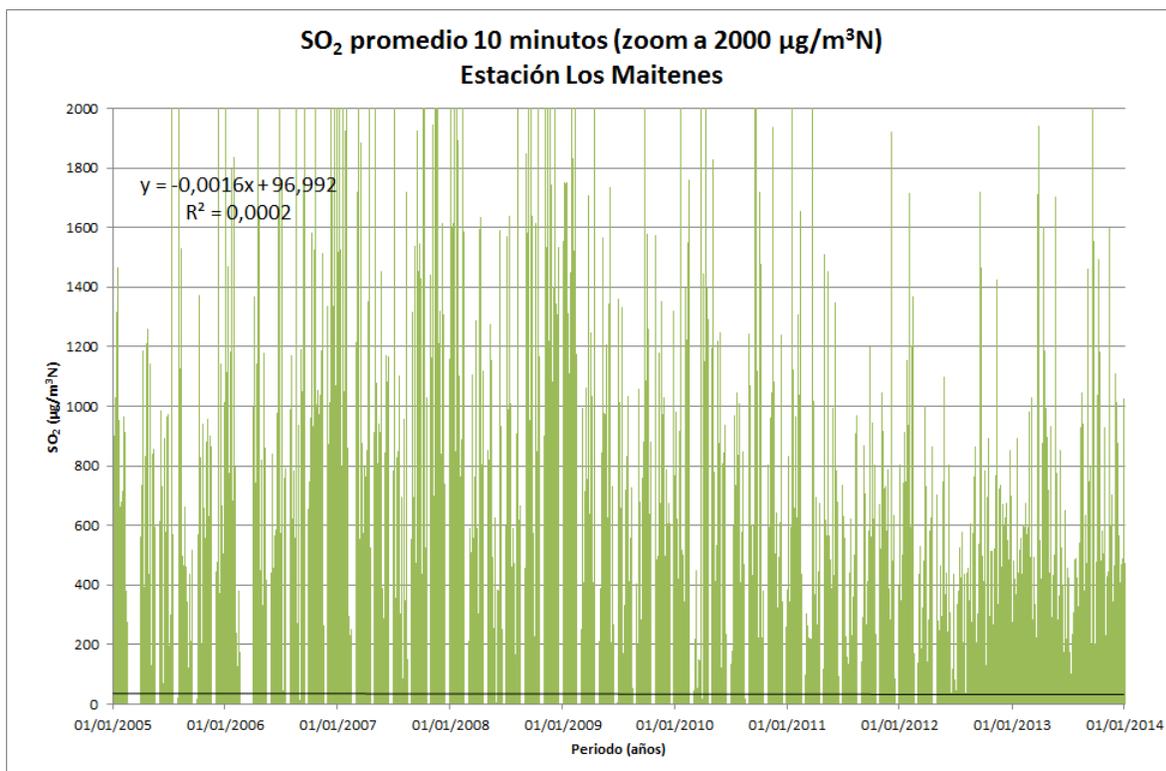
**Figura 62 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación La Greda, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones, distinguiéndose menos alzas a partir del año 2011 en adelante.



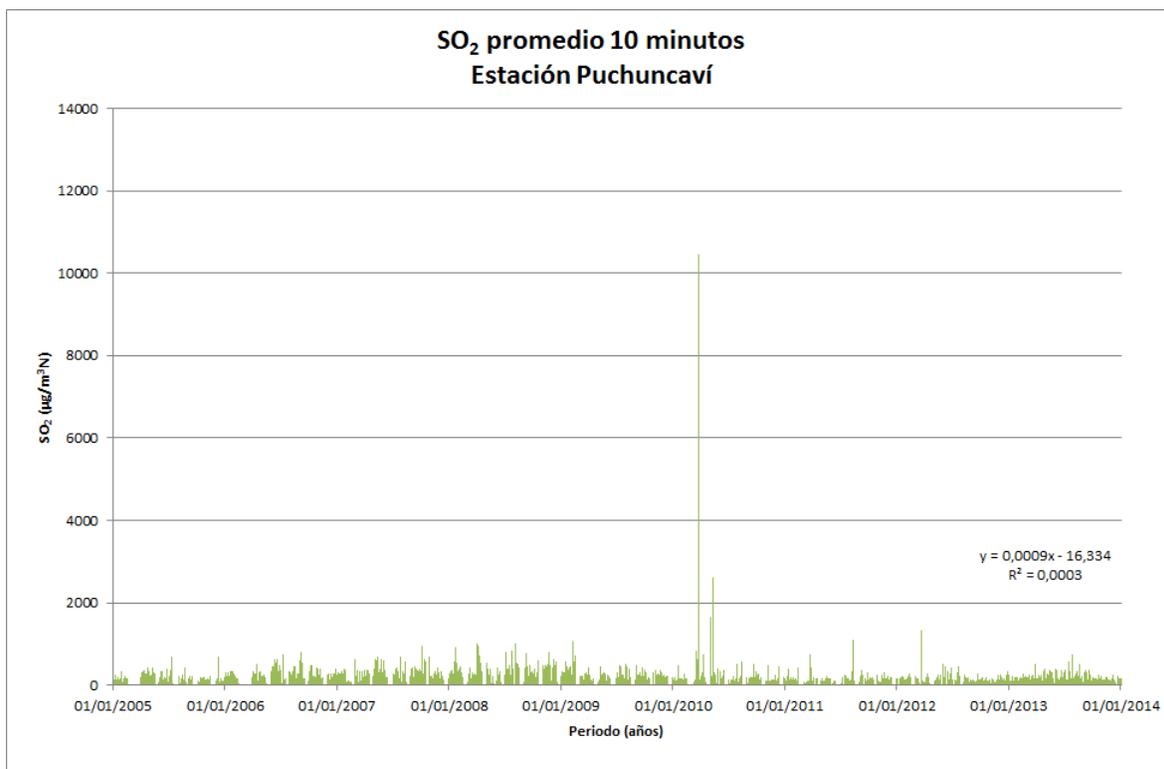
**Figura 63 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Los Maitenes, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Los Maitenes, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores en torno a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores superiores a los 2000 µg/m<sup>3</sup>N y un valor extremo que supera los 8000 µg/m<sup>3</sup>N.



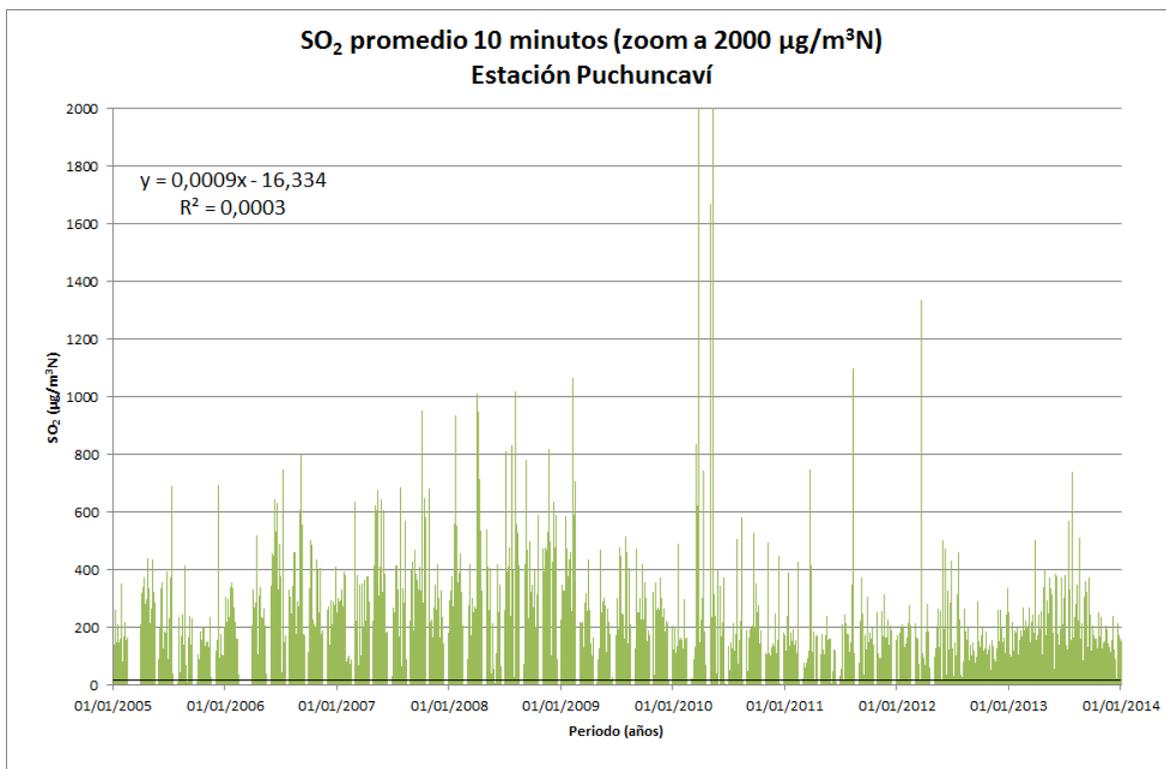
**Figura 64 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Los Maitenes, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones, distinguiéndose una menor densidad de barras sobre 1000 µg/m<sup>3</sup>N a partir del año 2011 en adelante.



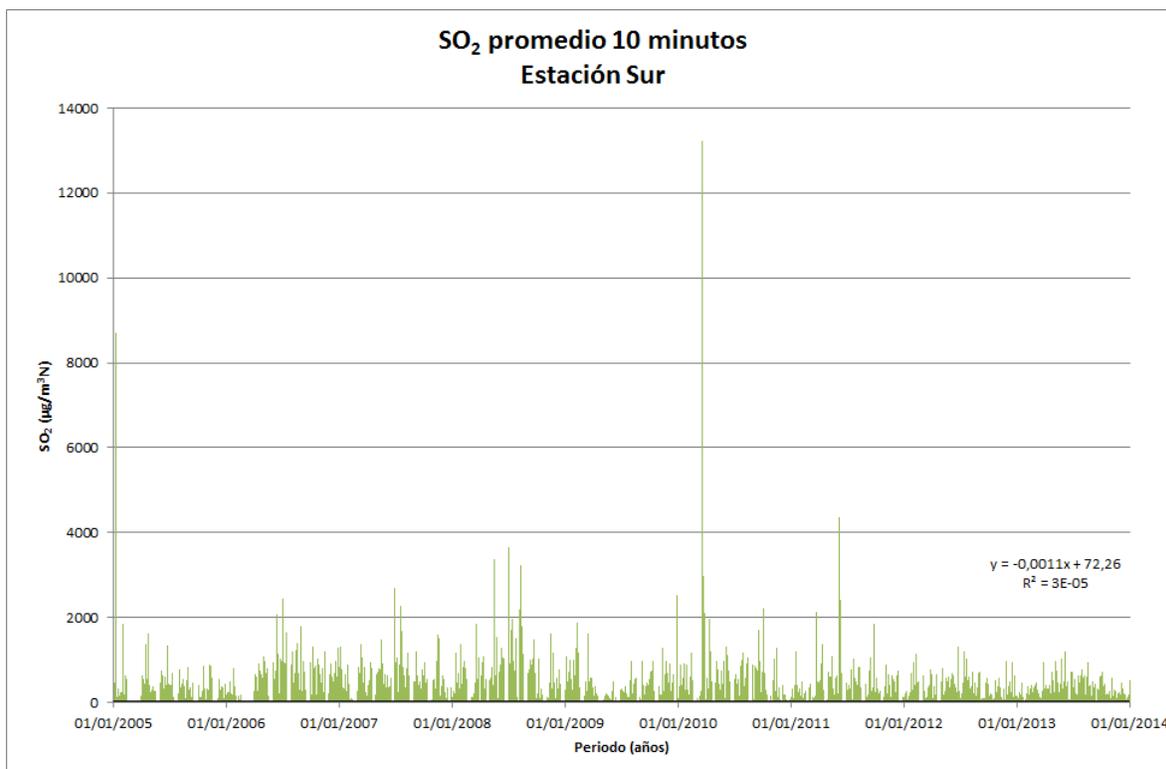
**Figura 65 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Puchuncaví, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Puchuncaví, se aprecia que las concentraciones presentan valores bajo los 2000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, se observa la ocurrencia de dos valores altos, siendo uno de ellos incluso superior a los 10000 µg/m<sup>3</sup>N.



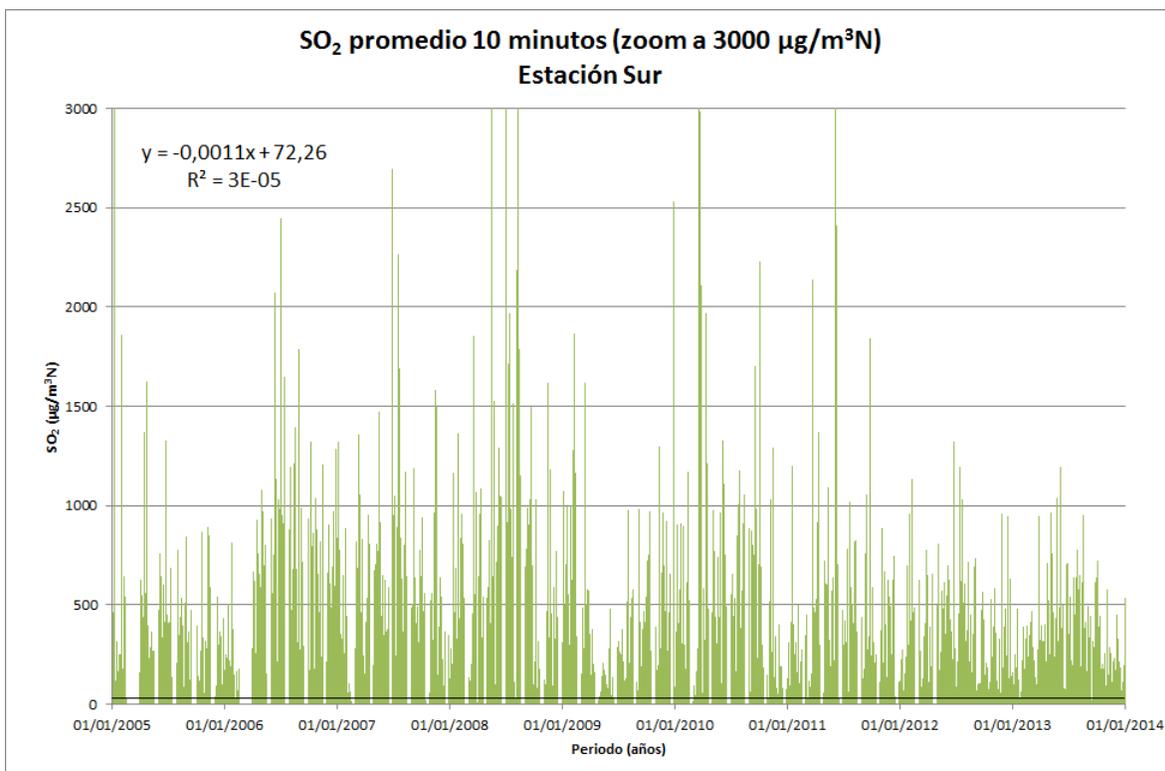
**Figura 66 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Puchuncaví, Quintero – Puchuncaví, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Puchuncaví es posible distinguir una tendencia negativa en las concentraciones, al observar los valores iguales o inferiores a 2000 µg/m<sup>3</sup>N. Sin embargo, numéricamente se obtiene una tendencia al alza en la ecuación. Esto último se debe principalmente al valor aislado superior a 10000 µg/m<sup>3</sup>N registrado el 26 de marzo del año 2010. No obstante si consideramos sólo el periodo 2010 a 2013 la línea de tendencia sería a la baja.



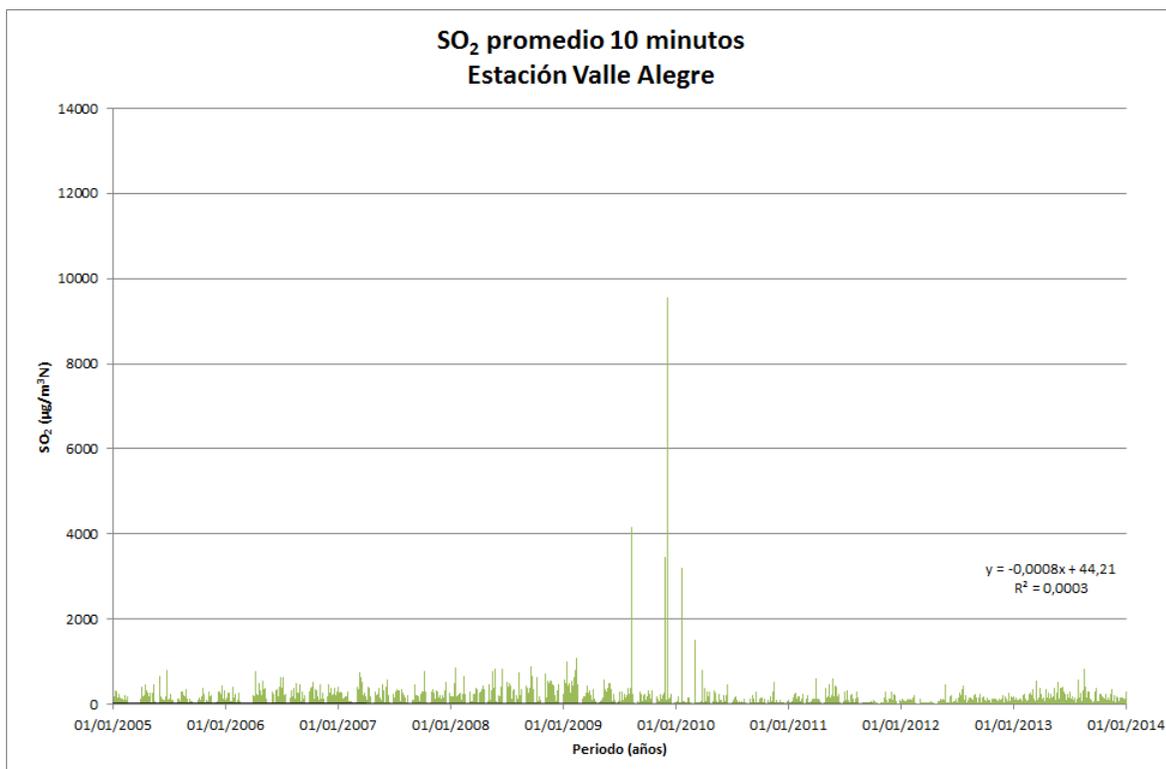
**Figura 67 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Sur, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Sur, se aprecia que en general las concentraciones se encuentran bajo los 4000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, se observa la ocurrencia de dos valores altos, siendo uno de ellos incluso superior a los 12000 µg/m<sup>3</sup>N.



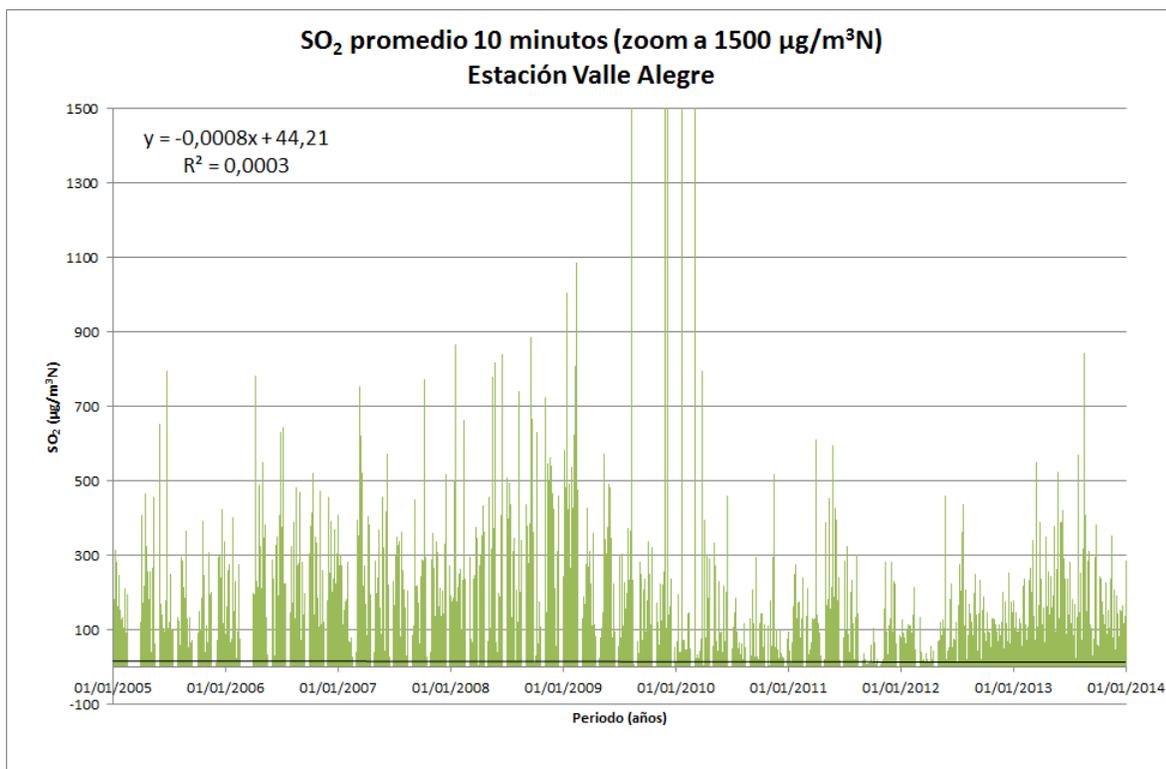
**Figura 68 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Sur, Quintero – Puchuncaví, zoom a 3000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 3000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones.



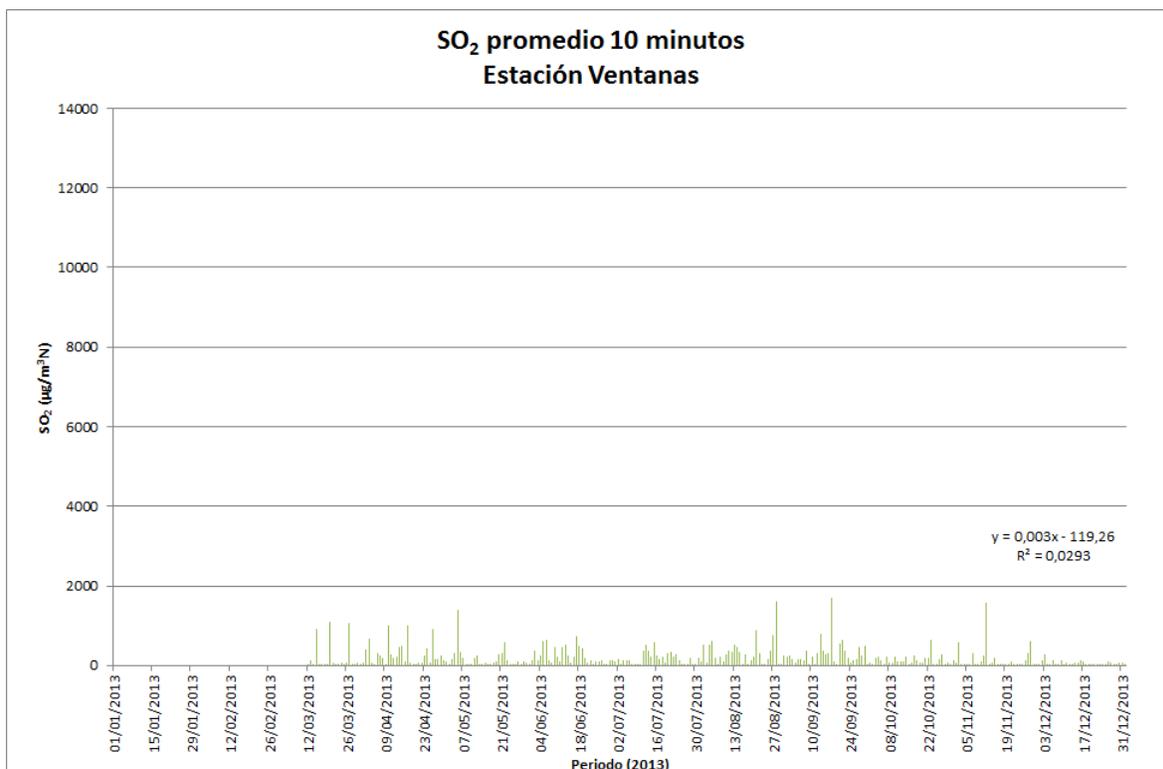
**Figura 69 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Valle Alegre, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Valle Alegre, se aprecia que en general las concentraciones se encuentran bajo los 2000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, se observa la ocurrencia de algunos valores altos, siendo uno de ellos superior a los 8000 µg/m<sup>3</sup>N.



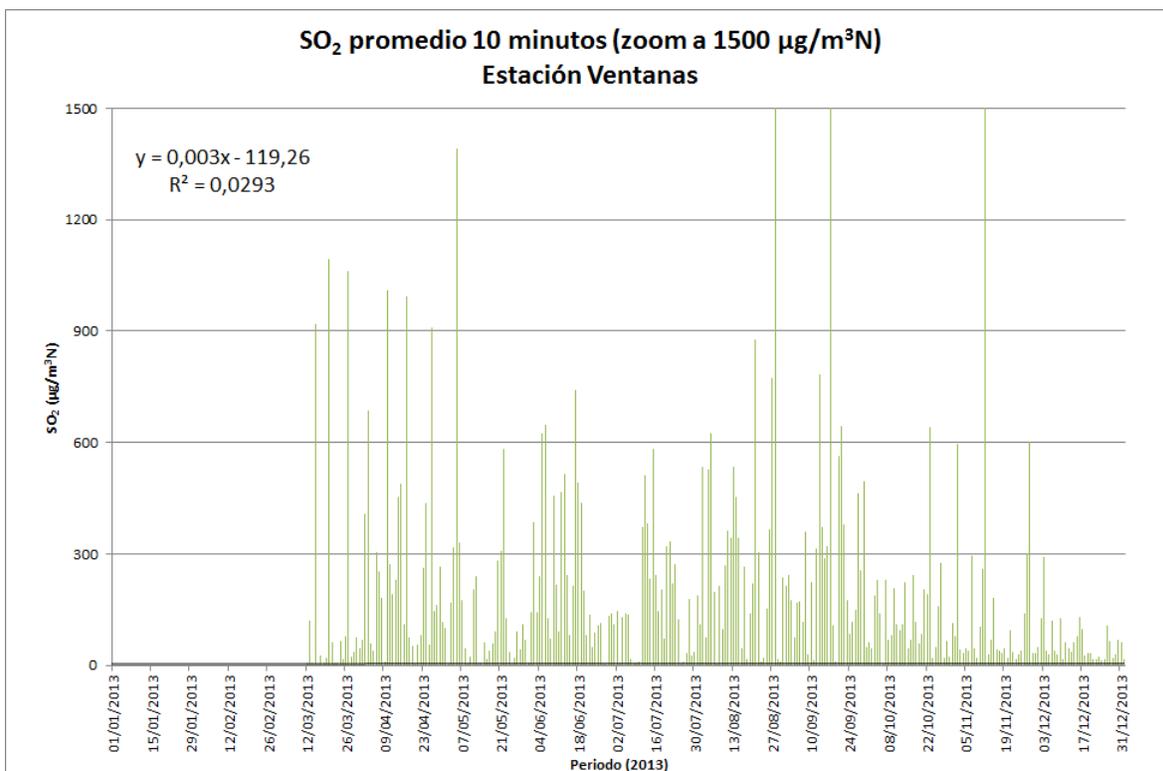
**Figura 70 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Valle Alegre, Quintero – Puchuncaví, zoom a 1500 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 1500 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones, especialmente si consideramos el periodo 2009 - 2013.



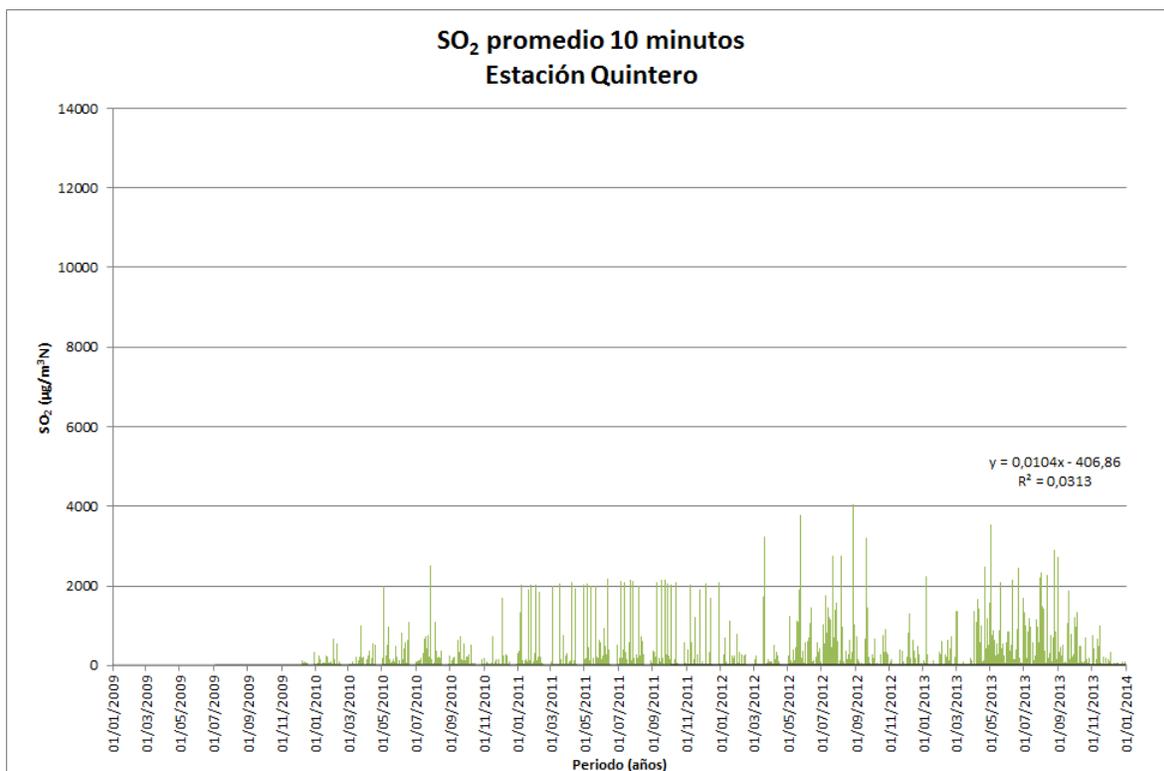
**Figura 71 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Ventanas, se aprecia que en general las alzas en las concentraciones ocurren alrededor de los 1000 µg/m<sup>3</sup>N. A pesar de que sólo se puede evaluar un año de registro (2013), estos valores son representativamente más bajos que las otras estaciones pertenecientes a la zona de Quinteros – Puchuncaví.



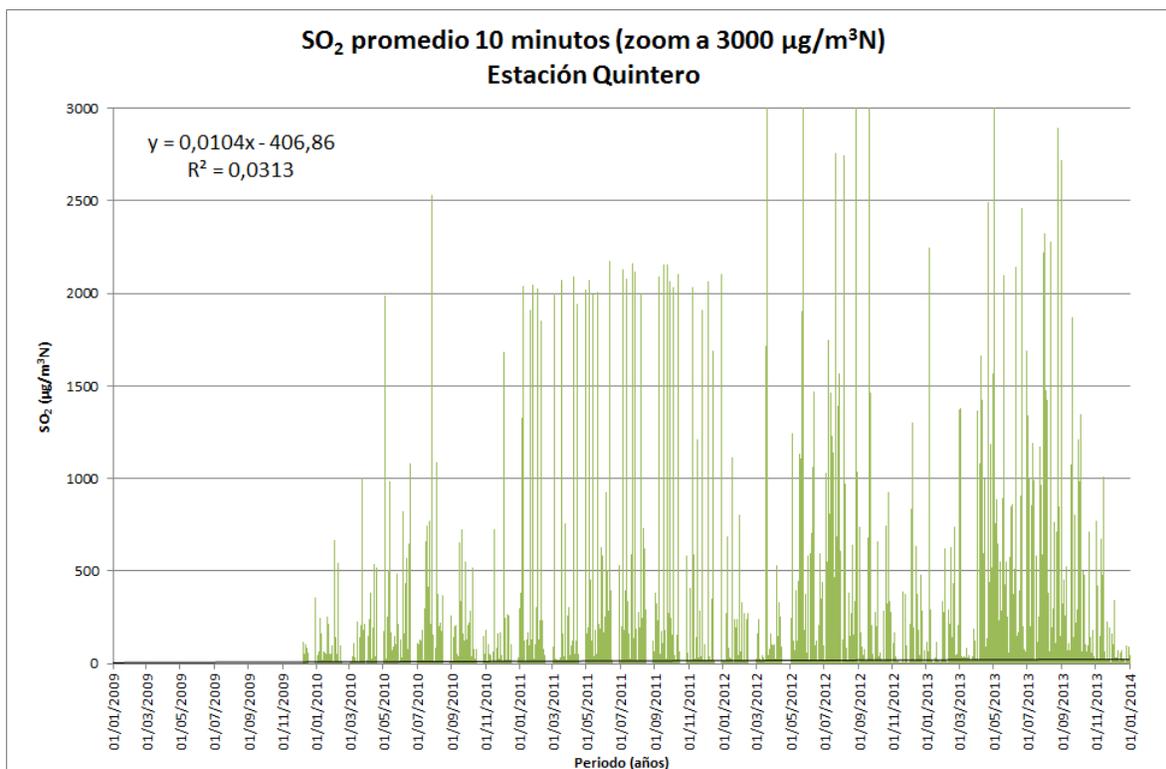
**Figura 72 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví, zoom a 1500 µg/m<sup>3</sup>N.**

Haciendo el alcance de que sólo se puede evaluar un año de medición (2013), la línea de tendencia es positiva en las concentraciones para la estación de Ventanas.



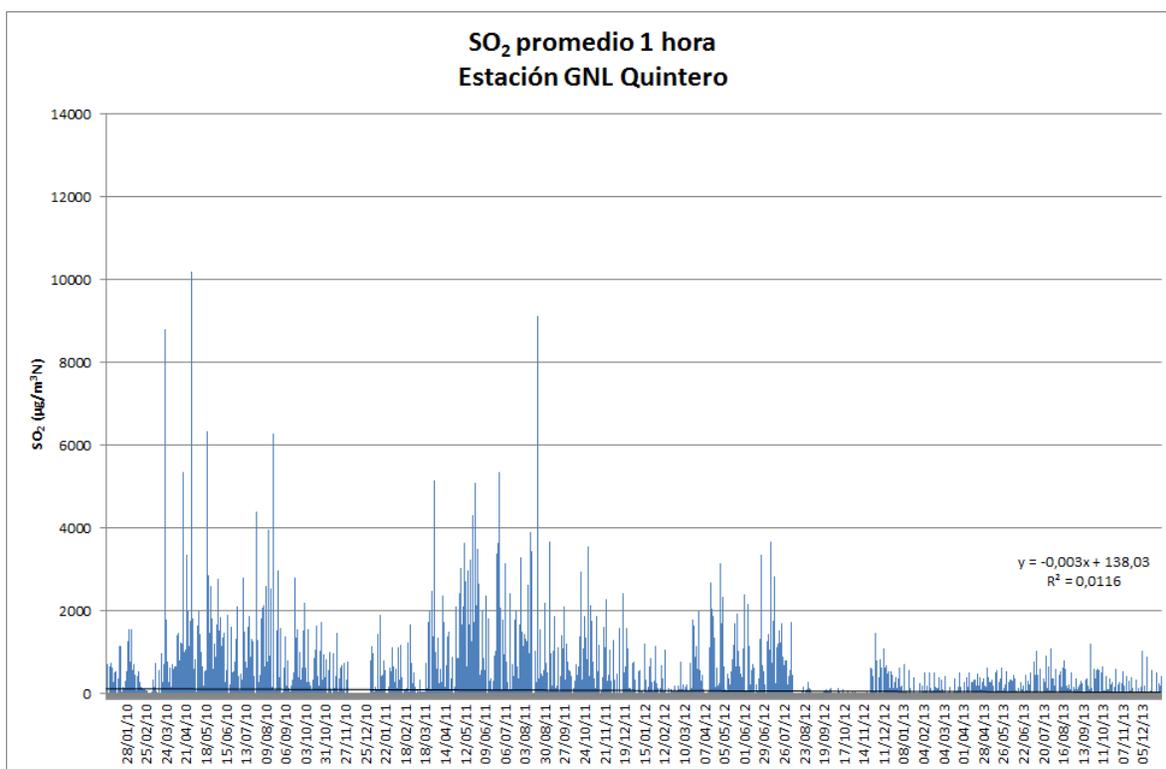
**Figura 73 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Quintero, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación Quinteros, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores en torno a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante, también se observa la ocurrencia de valores superiores a los 2000 µg/m<sup>3</sup>N y un valor que supera los 4000 µg/m<sup>3</sup>N.



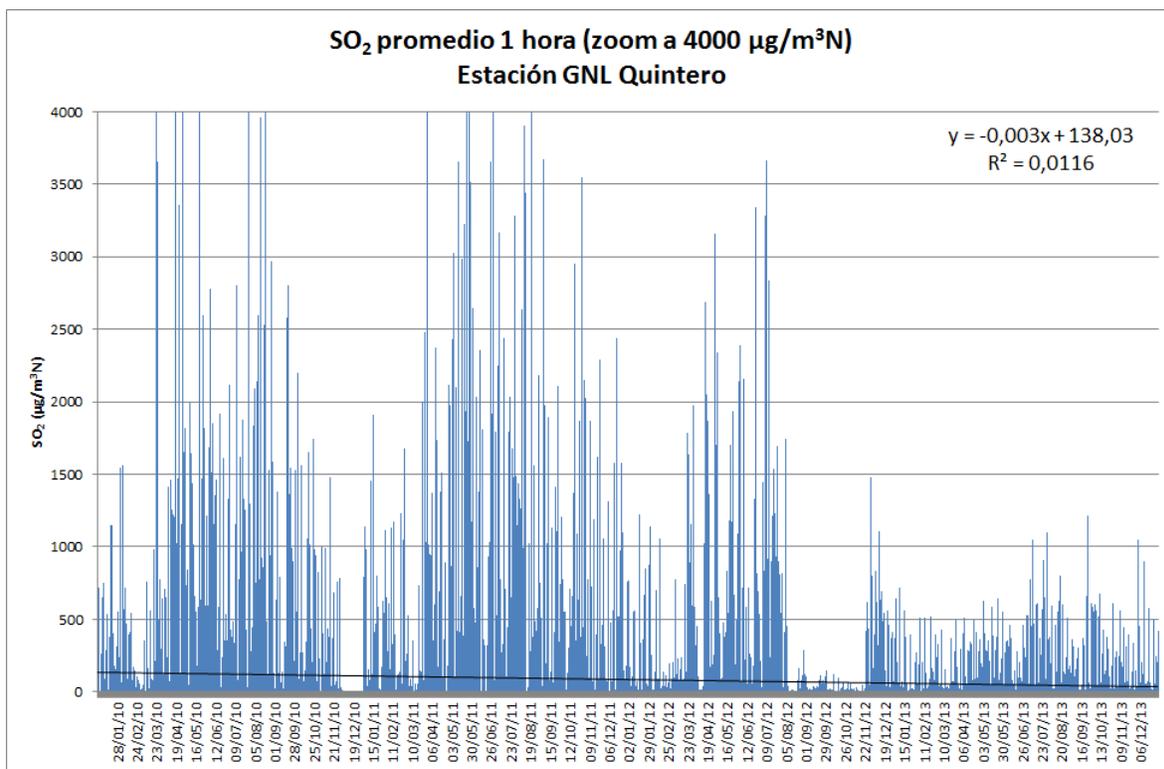
**Figura 74 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Ventanas, Quintero – Puchuncaví, zoom a 3000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 3000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una línea de tendencia positiva en las concentraciones. La densidad de alzas sobre 2500 µg/m<sup>3</sup>N aumenta considerablemente a partir del año 2012.



**Figura 75 . Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación GNL Quintero, Quintero – Puchuncaví.**

En la estación GNL Quintero, las concentraciones superan con frecuencia los 2000 µg/m<sup>3</sup>N durante el periodo 2010 – 2012. Los mayores peaks de concentración se observan alrededor de los 8000 µg/m<sup>3</sup>N.

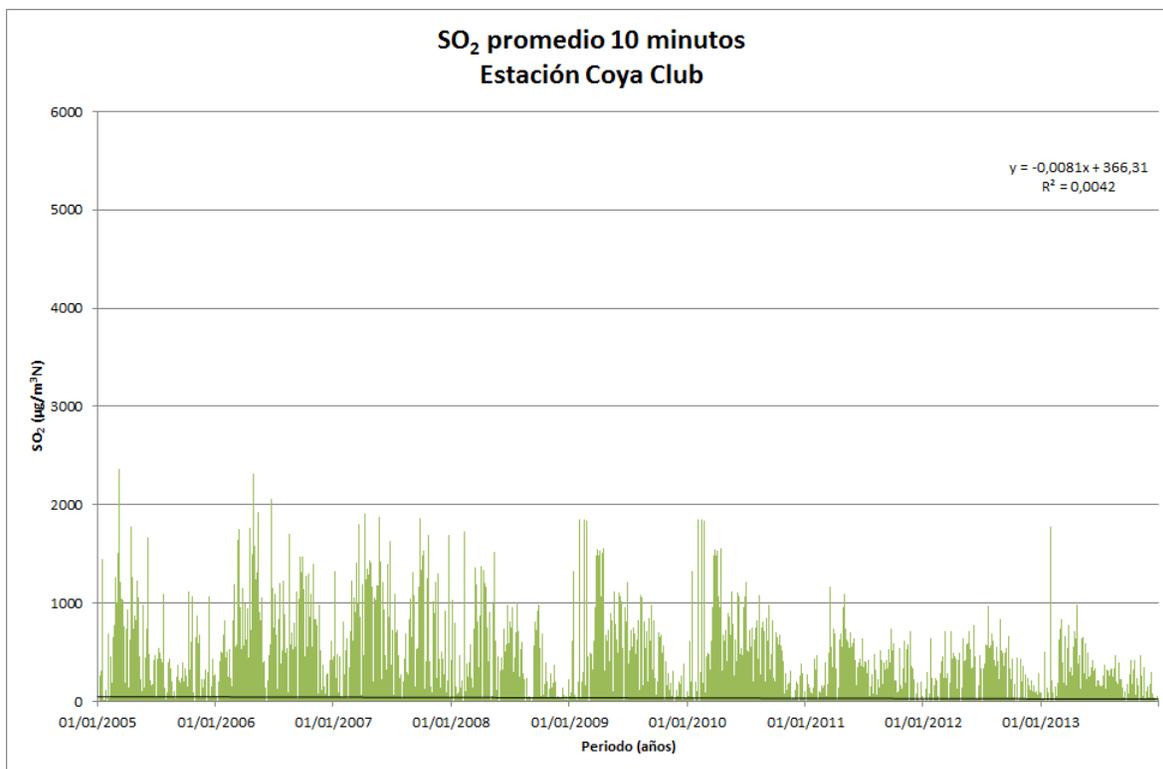


**Figura 76 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación GNL Quintero, Quintero – Puchuncaví, zoom a 4000 µg/m<sup>3</sup>N.**

El zoom a 4000 µg/m<sup>3</sup>N permite apreciar que la línea de tendencia presenta una pendiente negativa, es decir, hay tendencia a la baja en las concentraciones de SO<sub>2</sub> en esta estación. Al parecer las mayores alzas se encuentran en periodos de invierno.

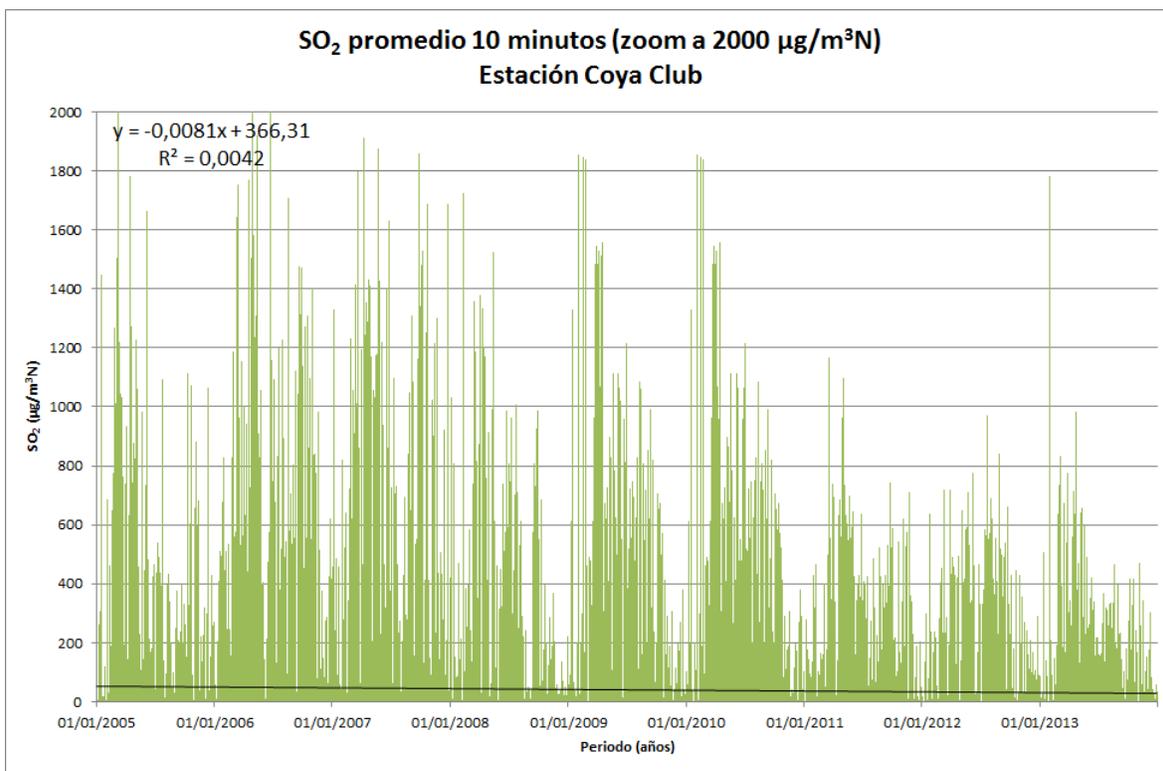
## ix) MACHALÍ - COYA

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a Coya club, Coya población, Cauquenes y Cipreses. Las figuras siguientes muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 10 minutos, para el periodo considerado en el estudio.



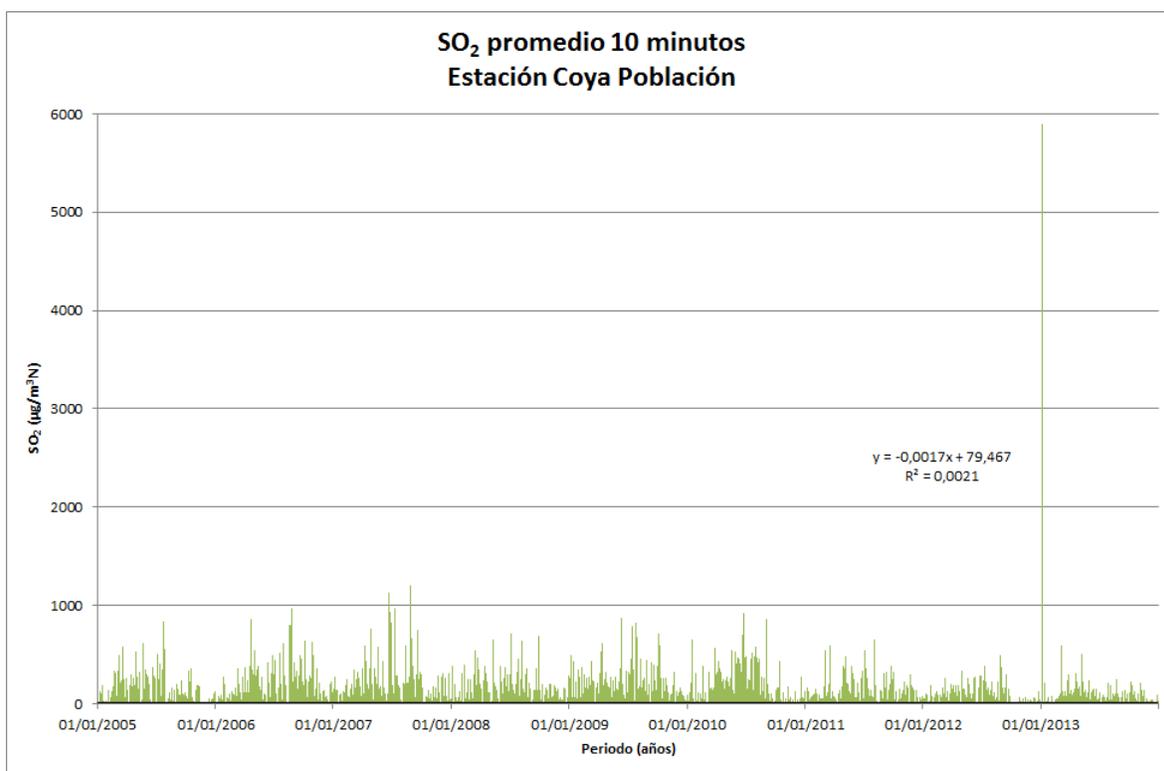
**Figura 77 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coya Club, Machalí – Coya.**

En la estación Coya Club, se aprecia en general que las concentraciones presentan con valores bajo los 2000 µg/m<sup>3</sup>N, aunque en tres oportunidades supera este valor.



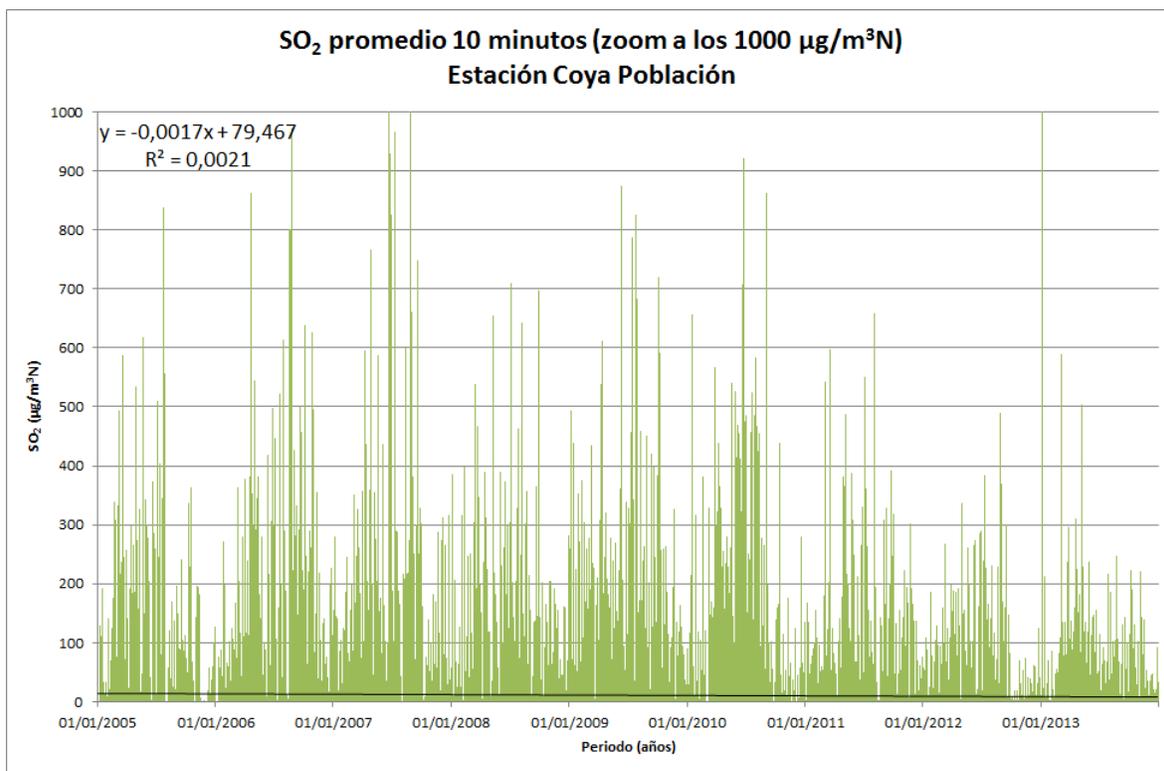
**Figura 78 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coya Club, Machalí - Coya, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

En la estación Coya Club, la tendencia lineal muestra una disminución en las concentraciones entre 2005 y 2013. Es posible distinguir una mayor densidad de peaks en periodos invernales.



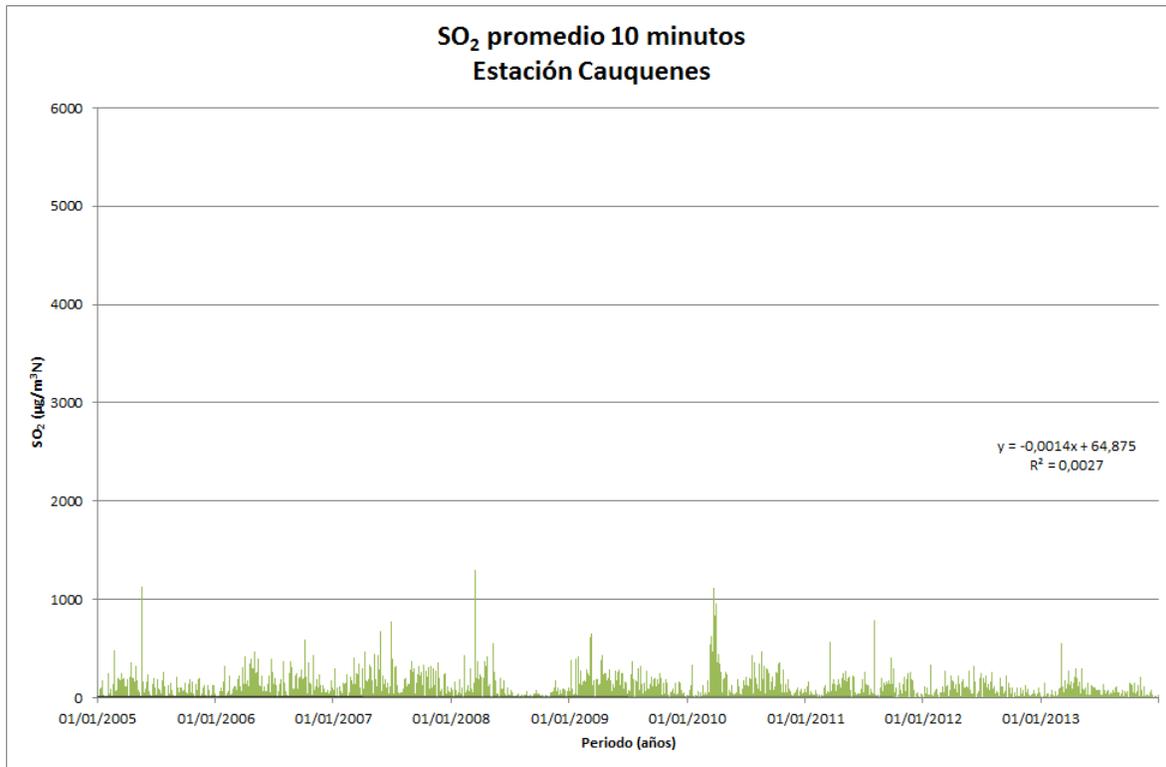
**Figura 79 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coya Población, Machalí – Coya.**

En la estación Coya Población, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores bajo los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, aunque en tres oportunidades supera este valor, dentro de los que se encuentra un valor escapado que supera 5000 µg/m<sup>3</sup>N.



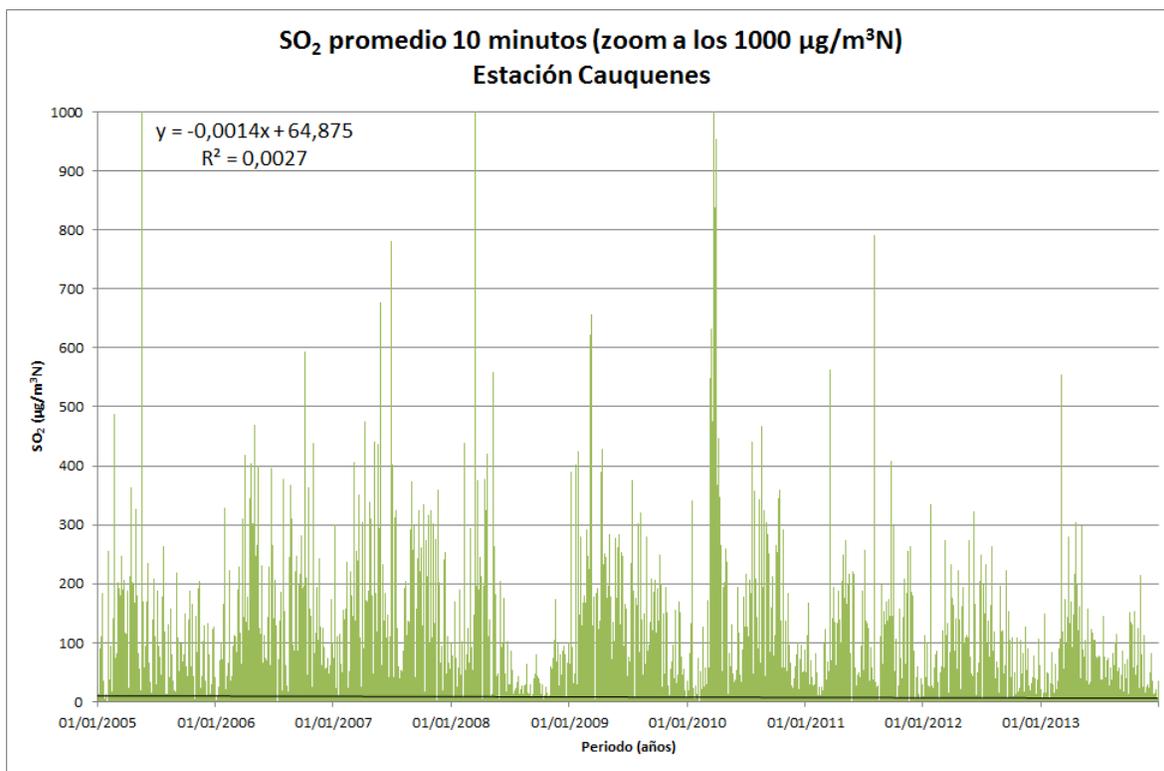
**Figura 80 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coya Población, Machalí – Coya, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 1000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones.



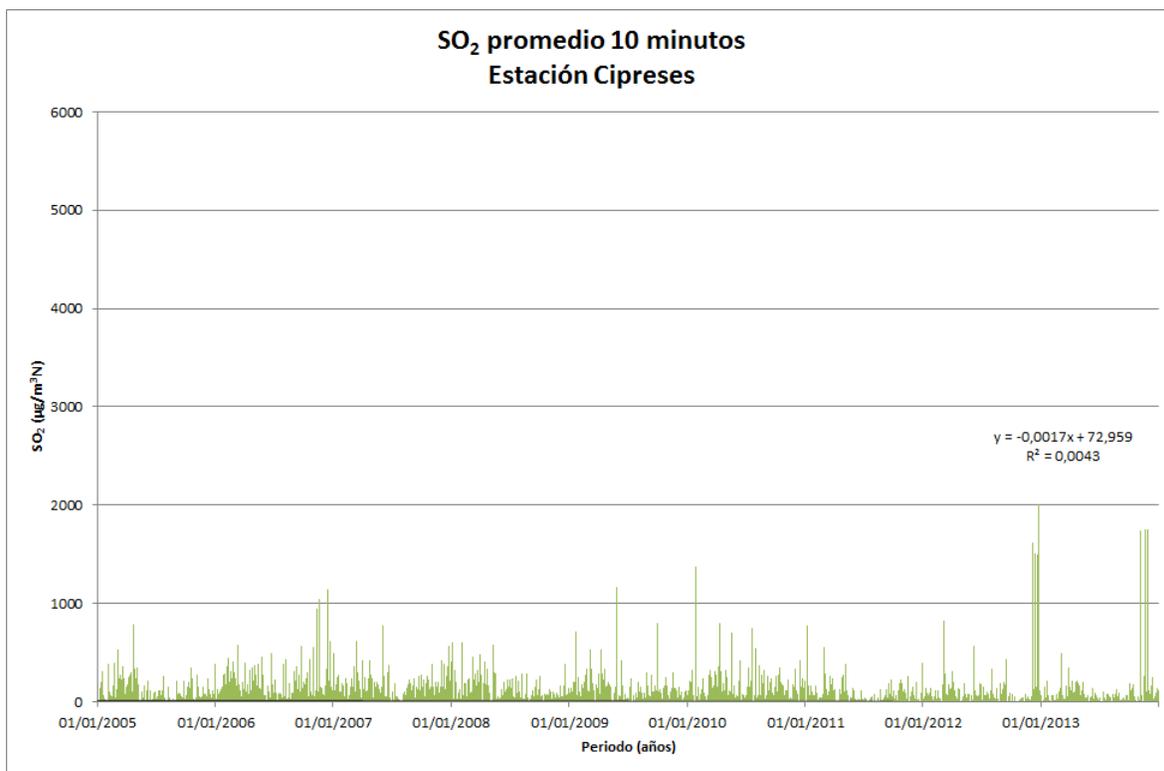
**Figura 81 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cauquenes, Machalí – Coya.**

En la estación Cauquenes, se aprecia en general que las concentraciones presentan valores bajo los 1000 µg/m<sup>3</sup>N, aunque en tres oportunidades supera este valor.



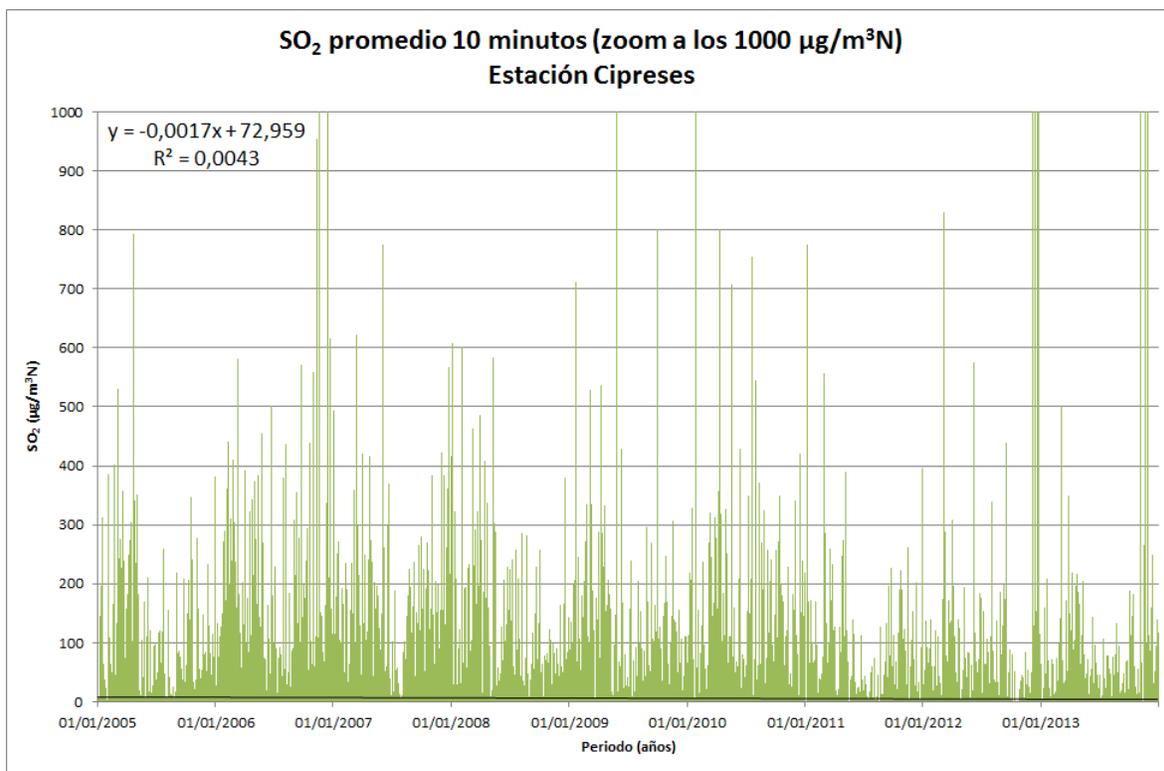
**Figura 82 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cauquenes, Machalí – Coya, zoom a 2000 µg/m<sup>3</sup>N.**

Al observar las concentraciones iguales o inferiores a 1000 µg/m<sup>3</sup>N, se puede apreciar que existe una ligera tendencia negativa en las concentraciones, distinguiéndose menos alzas a partir del año 2011 en adelante.



**Figura 83 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cipreses, Machalí – Coya.**

En la estación Cipreses, se aprecia que las concentraciones presentan valores bajo los 2000 µg/m<sup>3</sup>N. Las alzas más recurrentes están en torno a los 1000 µg/m<sup>3</sup>N.



**Figura 84 Promedio fijo de 10 minutos de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cipreses, Machalí – Coya, zoom a 1000 µg/m<sup>3</sup>N.**

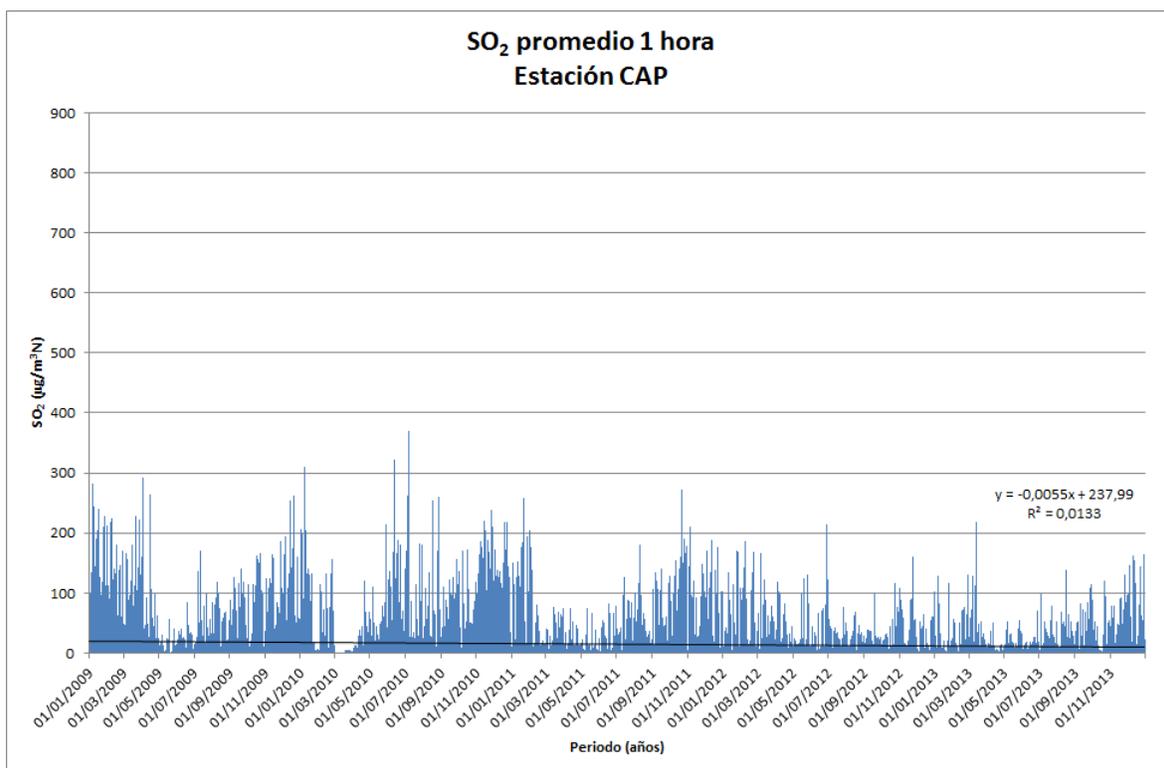
En la estación Cipreses, la tendencia lineal muestra una ligera disminución en las concentraciones entre los años 2005 y 2013.

## x) CORONEL – LOTA – HUALPÉN - TALCAHUANO

Las estaciones de calidad del aire consideradas en esta zona corresponden a:

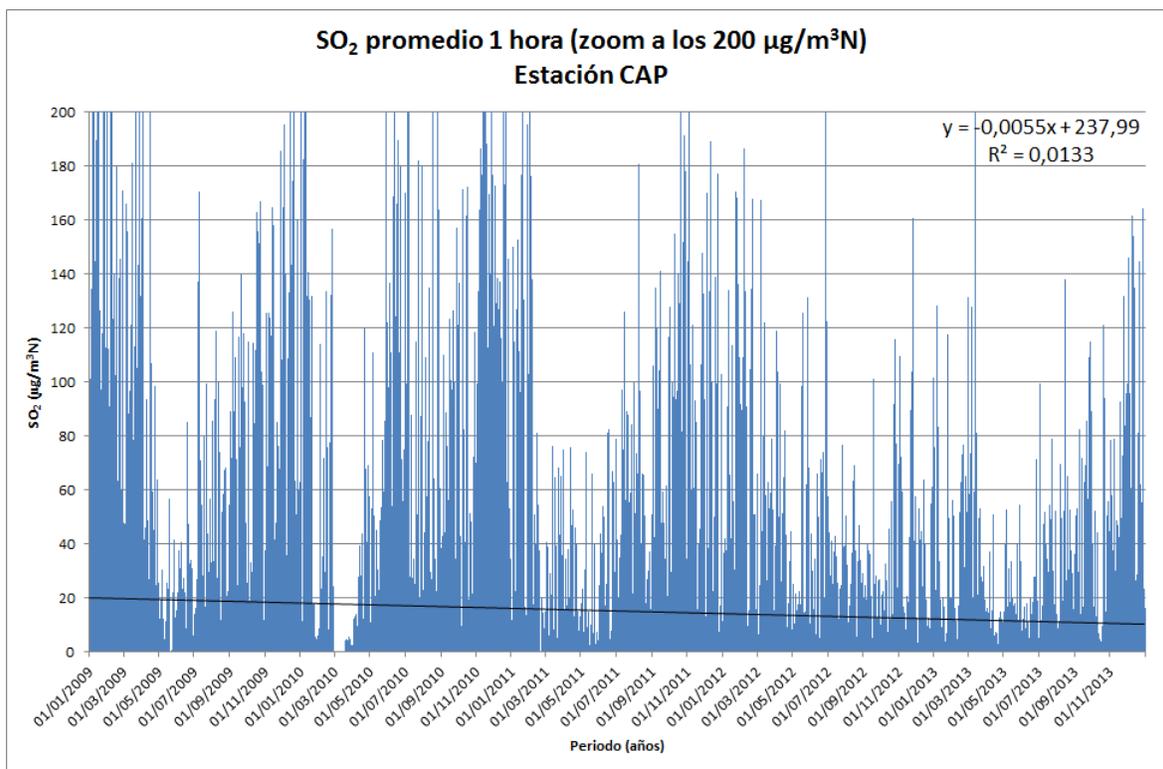
- CAP
- Inpesca
- Indura
- Junji
- Price
- Coronel Norte
- Coronel Sur
- Lagunillas
- Cerro Merquín
- Lota Urbana
- Lota Rural

Las figuras muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> de estas estaciones, en promedios de 1 hora, para el periodo considerado en el estudio.



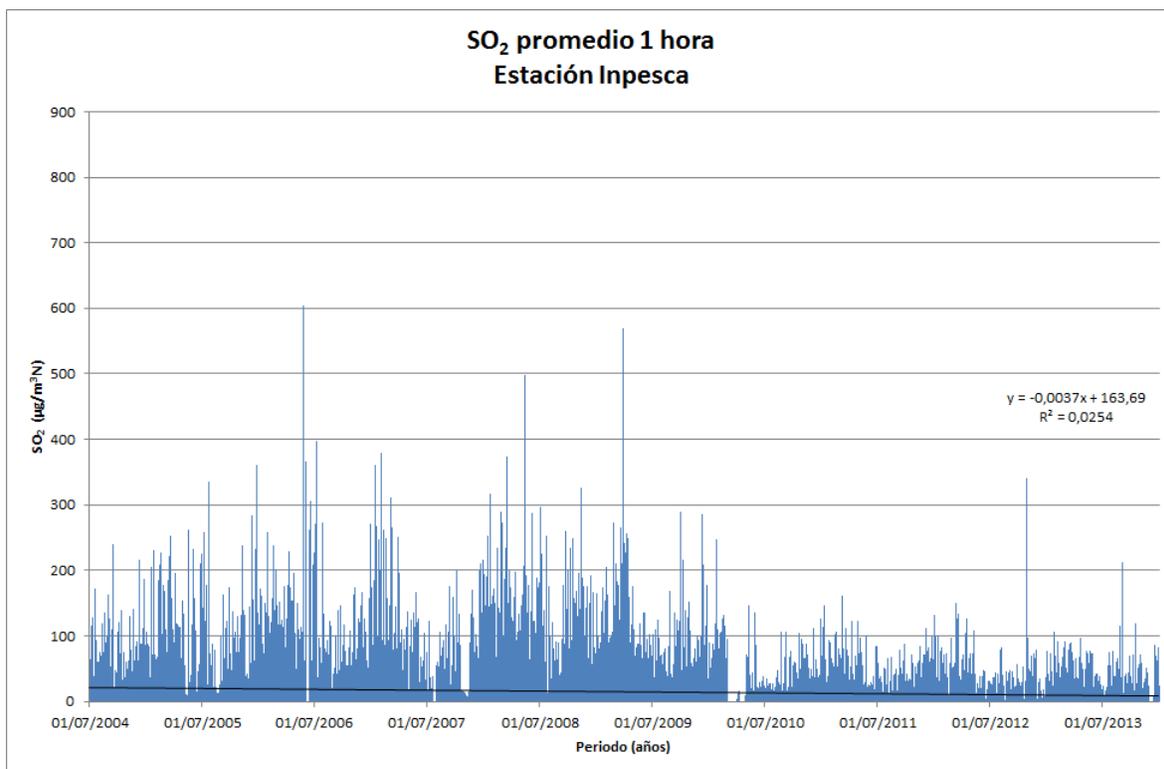
**Figura 85 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación CAP, Talcahuano.**

Las concentraciones horarias en la estación CAP muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los  $200$  ó  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . El mayor peak registrado ocurrió el 06-07-2010, donde un valor horario alcanzó  $370 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ .



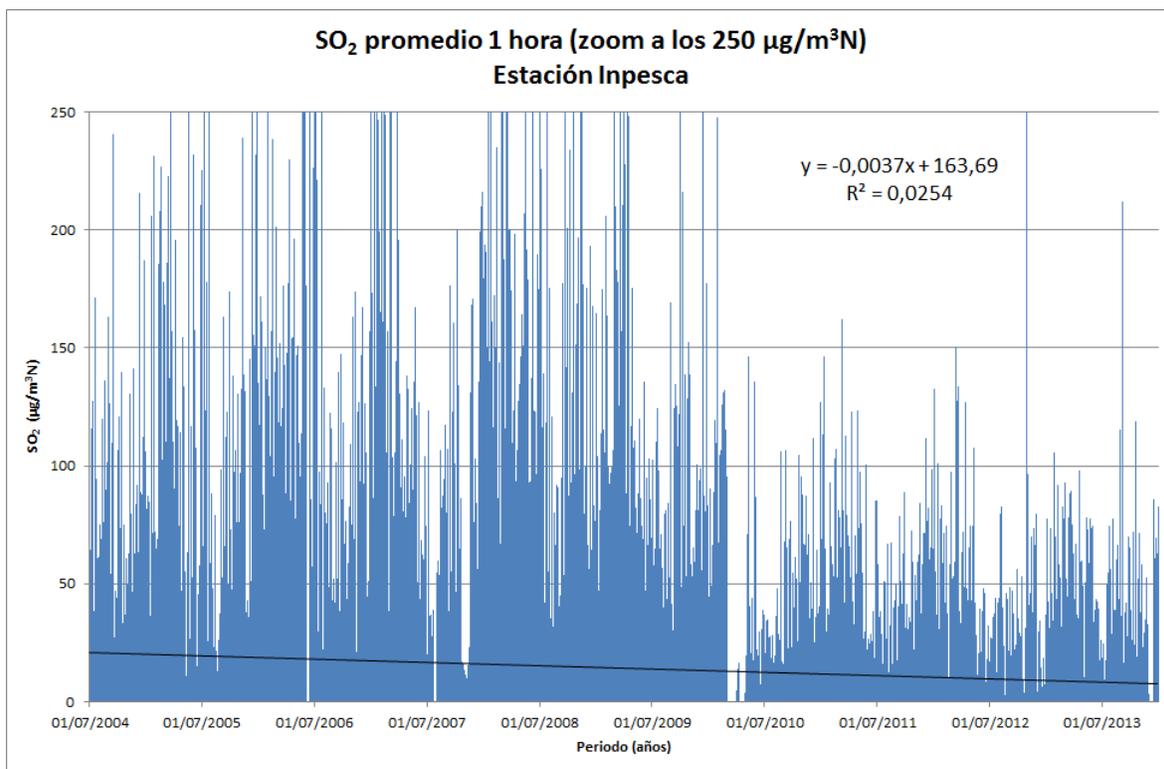
**Figura 86 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación CAP, Talcahuano, zoom a 200 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en la estación CAP, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



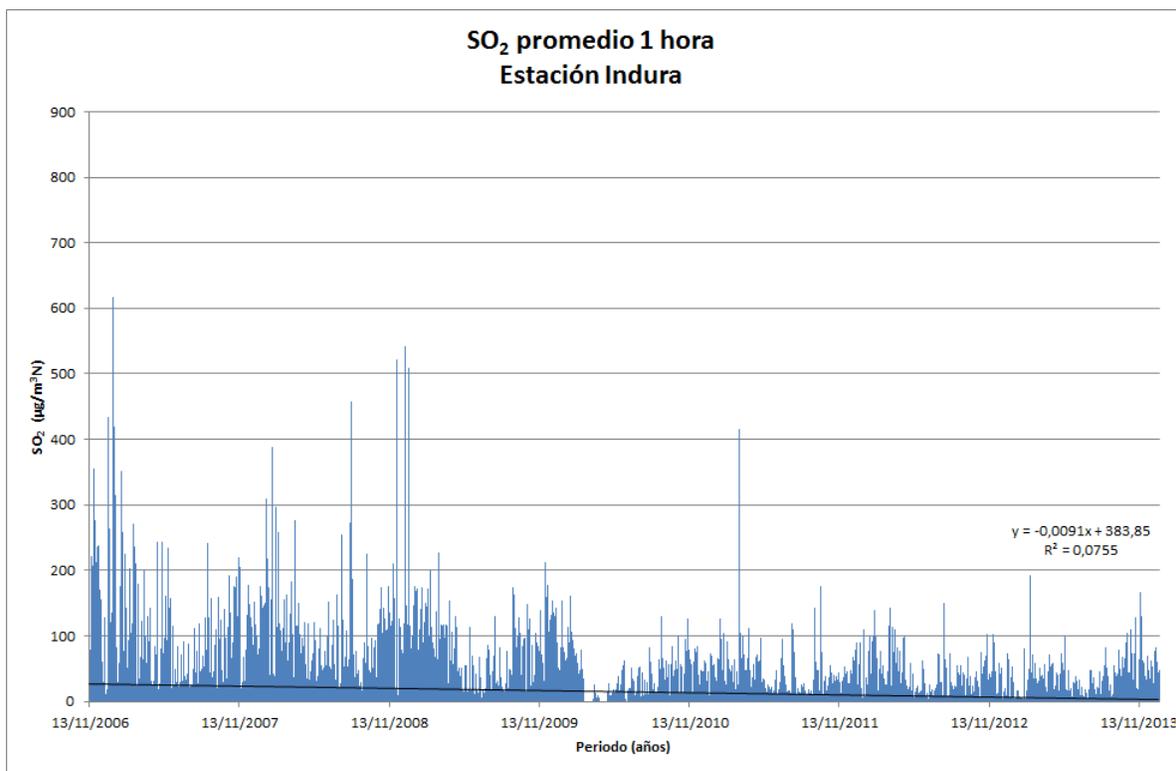
**Figura 87 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Inpesca, Talcahuano.**

Las concentraciones horarias en la estación Inpesca muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 250 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 500 ó 600 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 24-05-2006, donde un valor horario alcanzó 605 µg/m<sup>3</sup>N.



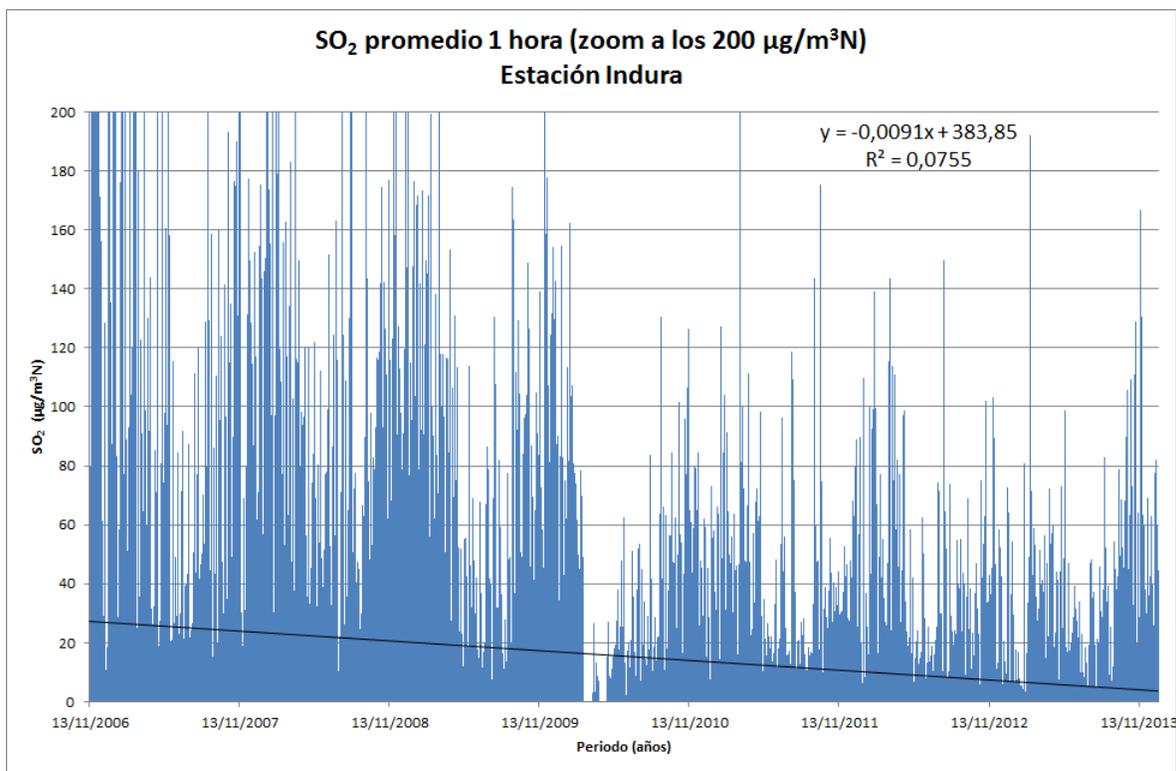
**Figura 88 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Inpesca, Talcahuano, zoom a 250 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 250 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Inpesca, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



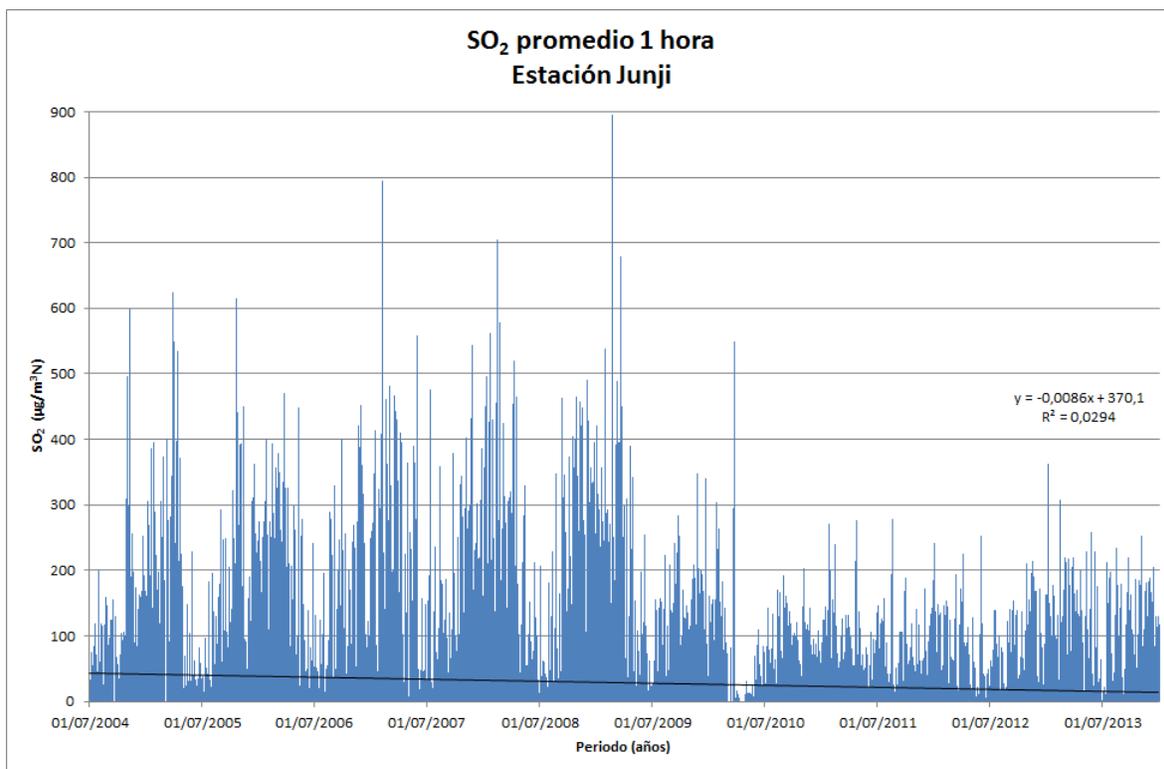
**Figura 89 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Indura, Talcahuano.**

Las concentraciones horarias en la estación Indura muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 200 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 500 ó 600 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 09-01-2007, donde un valor horario alcanzó 616 µg/m<sup>3</sup>N.



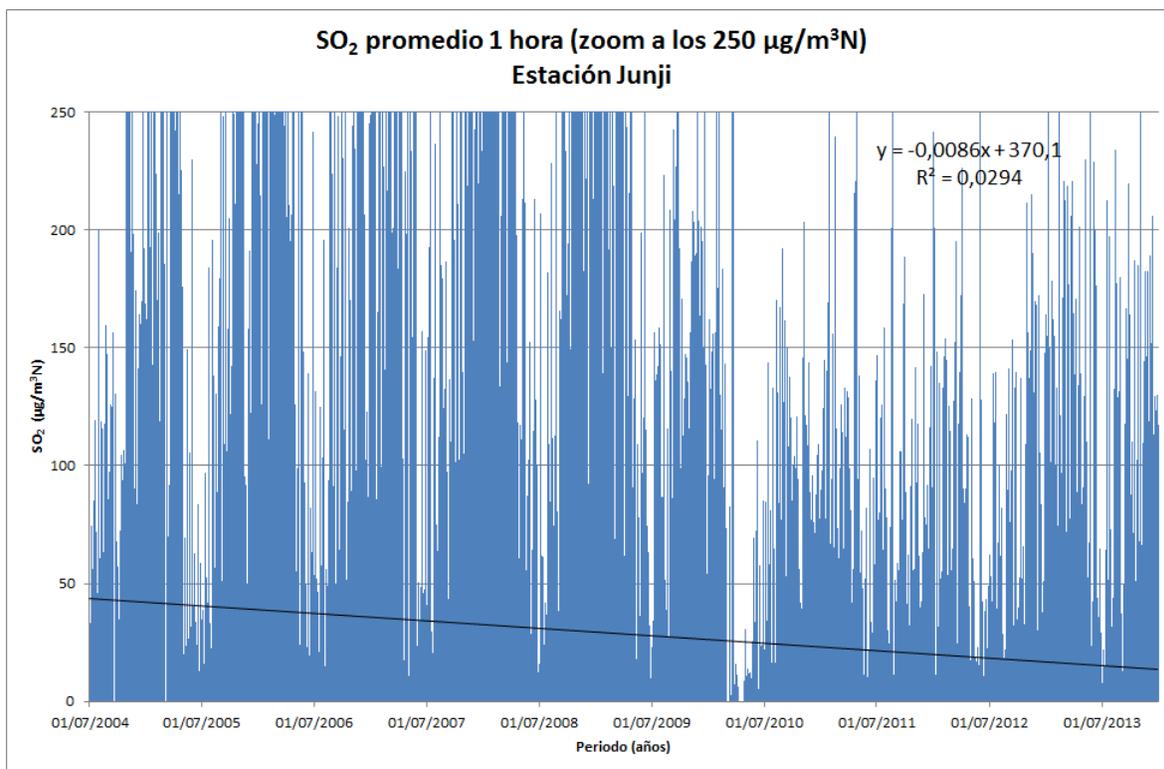
**Figura 90 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Indura, Talcahuano, zoom a 200 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 250 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Indura, muestran que existe una tendencia a disminuir las concentraciones.



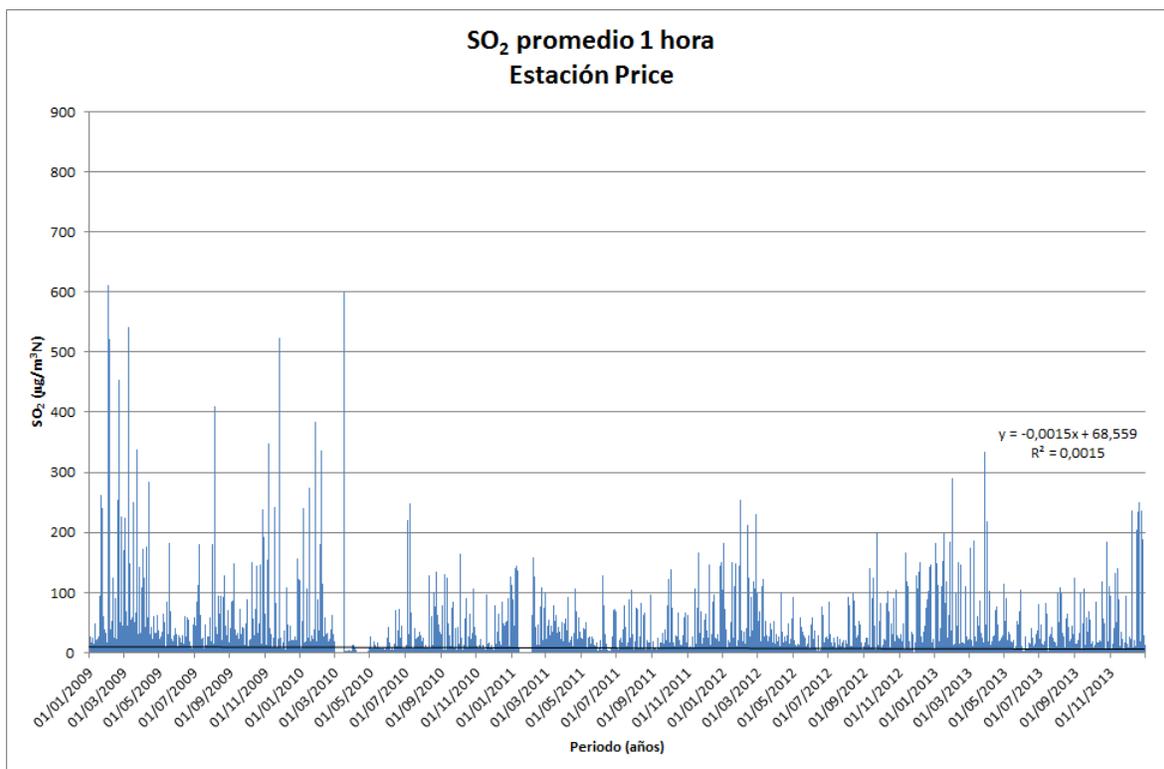
**Figura 91 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Junji, Hualpén.**

Las concentraciones horarias en la estación Junji muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 250 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 700 ó 800 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 21-02-2009, donde un valor horario alcanzó 896 µg/m<sup>3</sup>N.



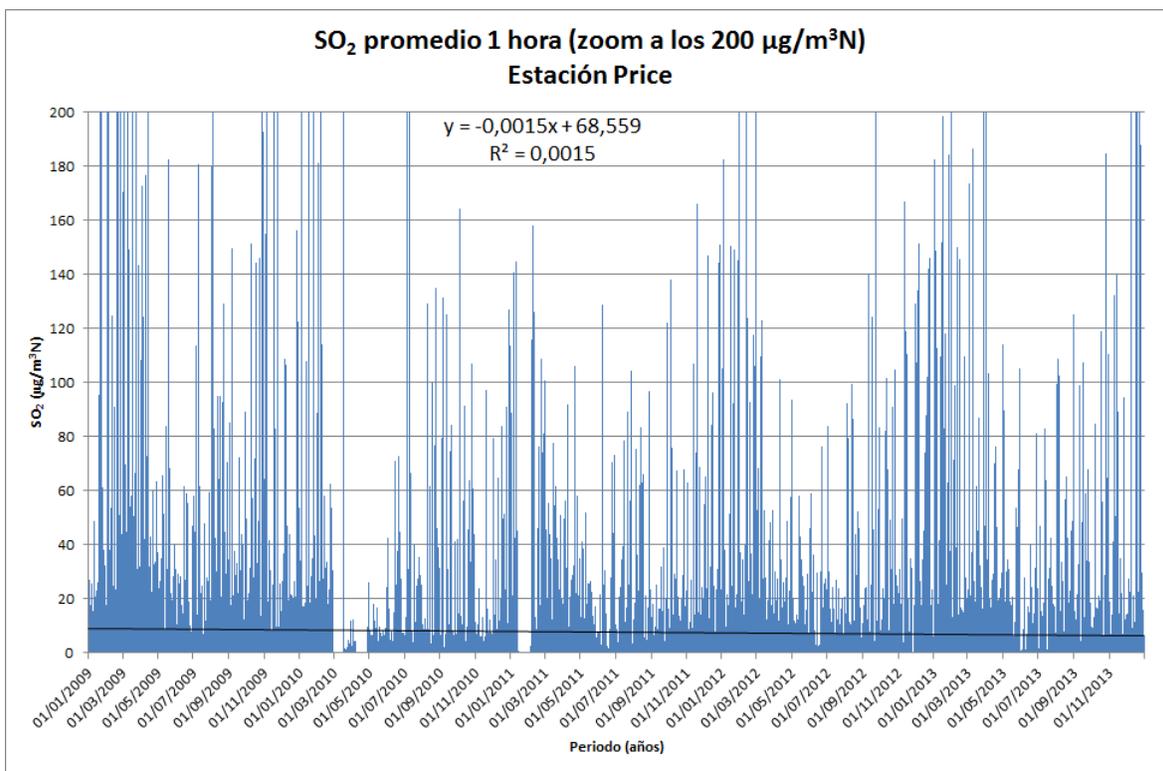
**Figura 92 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Junji, Hualpén, zoom a 250 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 250 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Junji, muestran que existe una tendencia a disminuir las concentraciones.



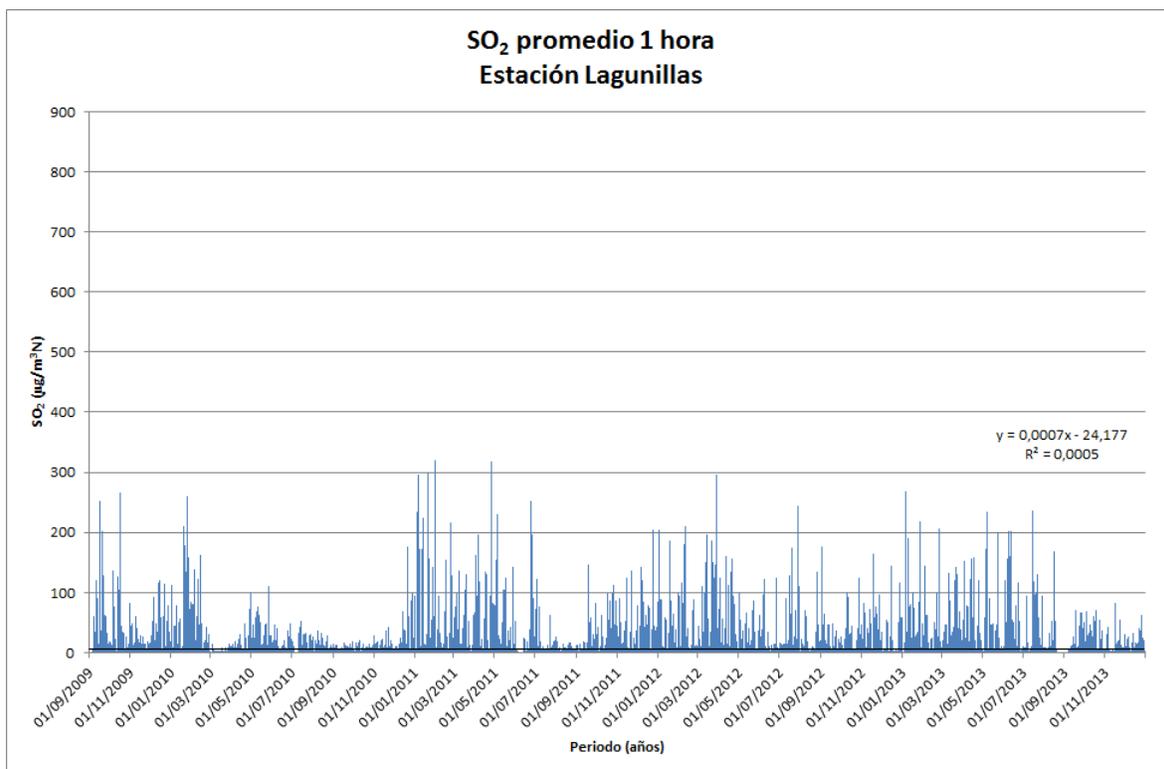
**Figura 93 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Price, Hualpén.**

Las concentraciones horarias en la estación Price muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 200 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 500 ó 600 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 02-02-2009, donde un valor horario alcanzó 612 µg/m<sup>3</sup>N.



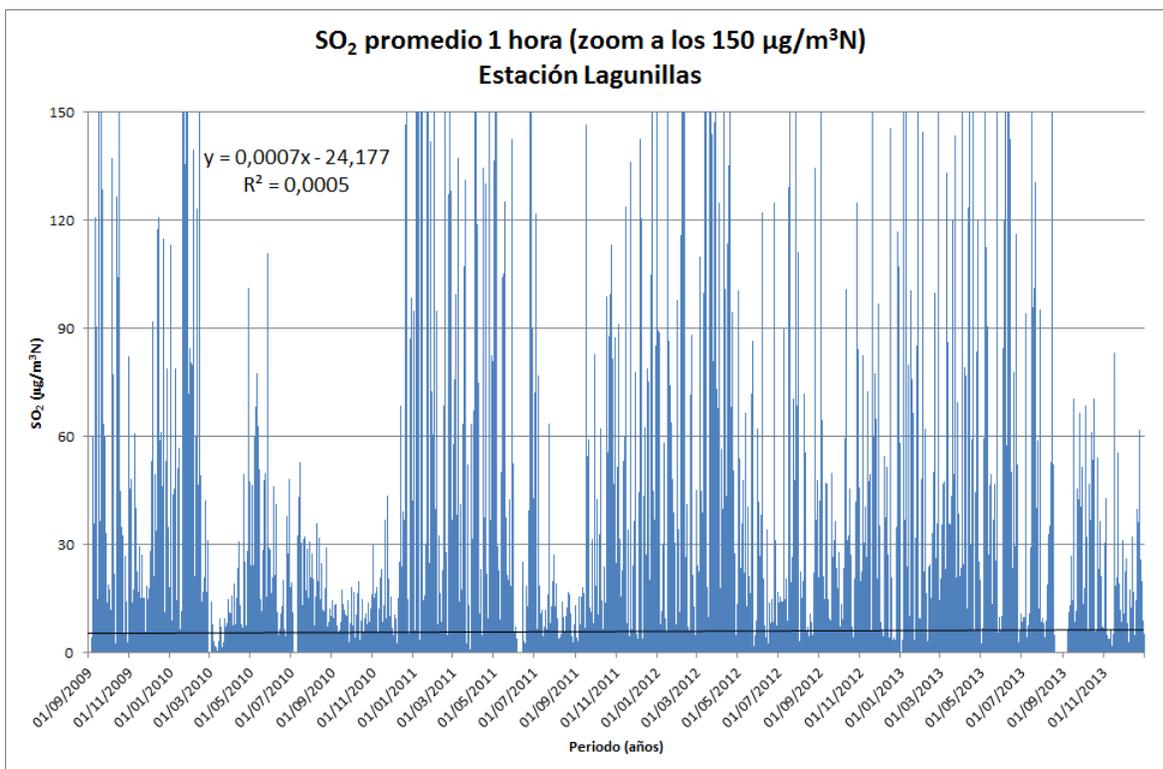
**Figura 94 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Price, Hualpén, zoom a 200 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 200 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Price, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



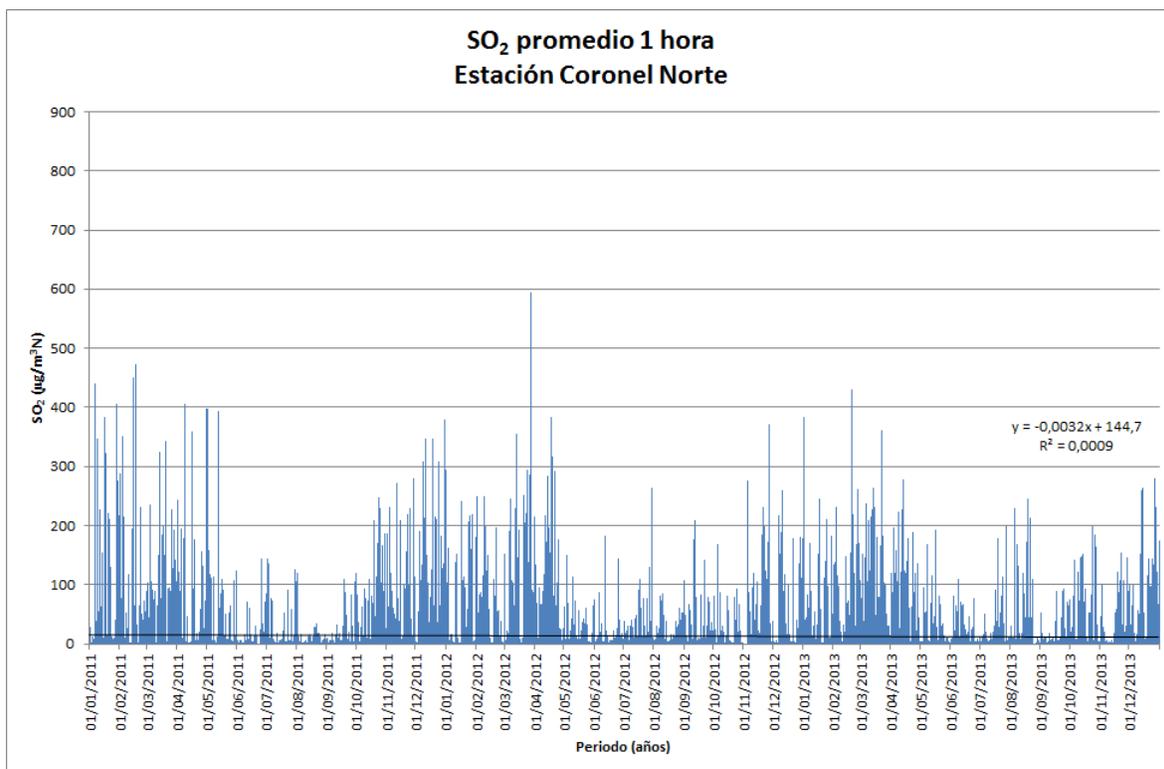
**Figura 95 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lagunillas, Coronel.**

Las concentraciones horarias en la estación Lagunillas muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 150 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 200 ó 300 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 31-01-2011, donde un valor horario alcanzó 320 µg/m<sup>3</sup>N.



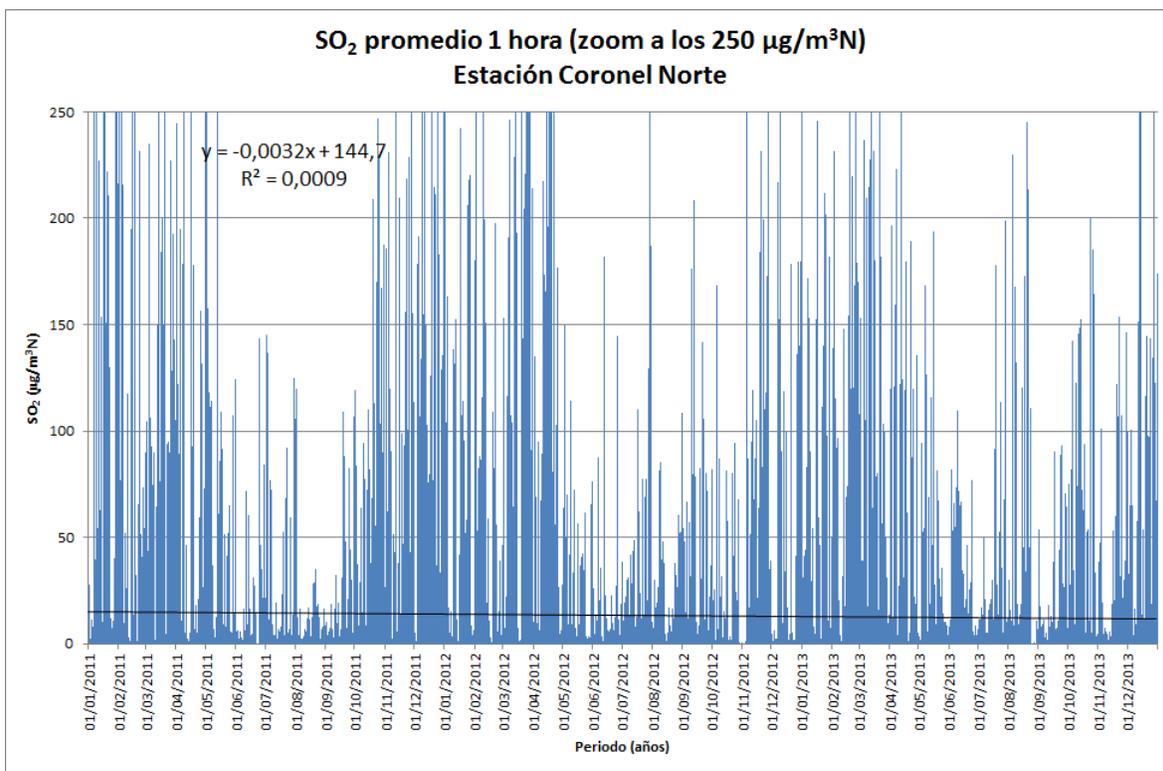
**Figura 96 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lagunillas, Coronel, zoom a 150 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 150 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Lagunillas, muestran que existe muy poca variación en cuanto a tendencia de las concentraciones, sin embargo numéricamente la tendencia es positiva.



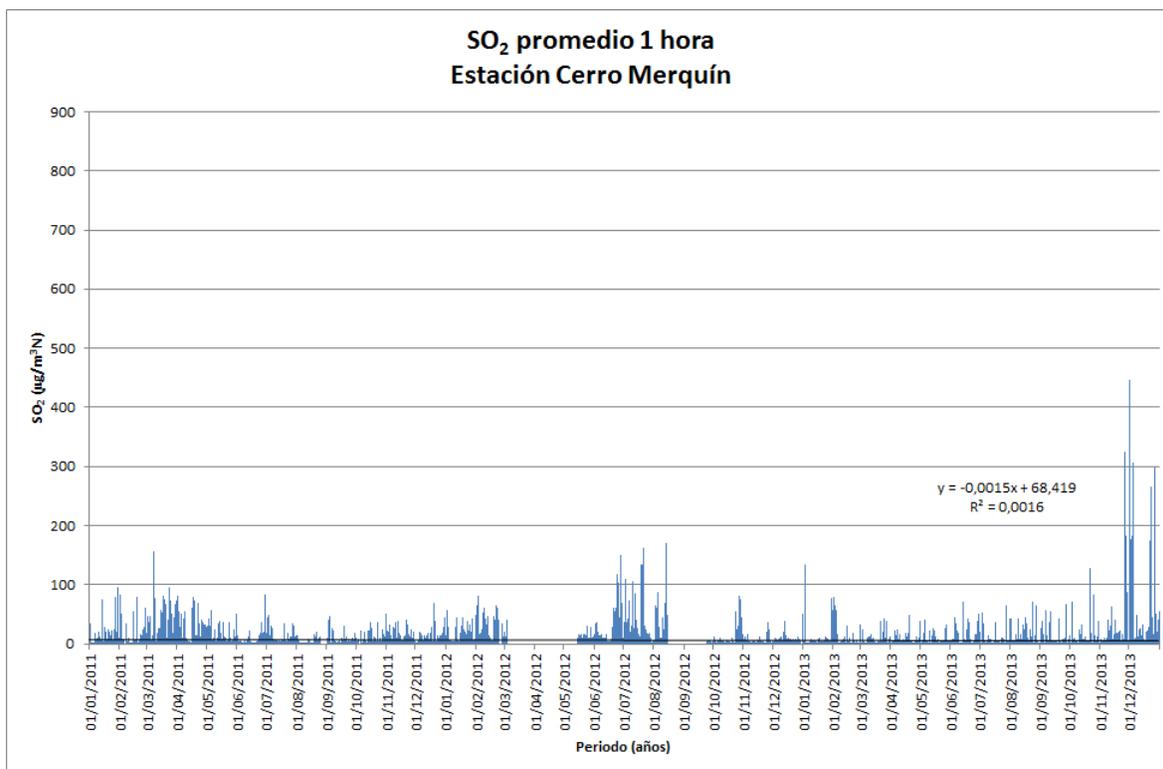
**Figura 97 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coronel Norte, Coronel.**

Las concentraciones horarias en la estación Coronel Norte muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 250 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 400 ó 500 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 27-03-2012, donde un valor horario alcanzó 549 µg/m<sup>3</sup>N.



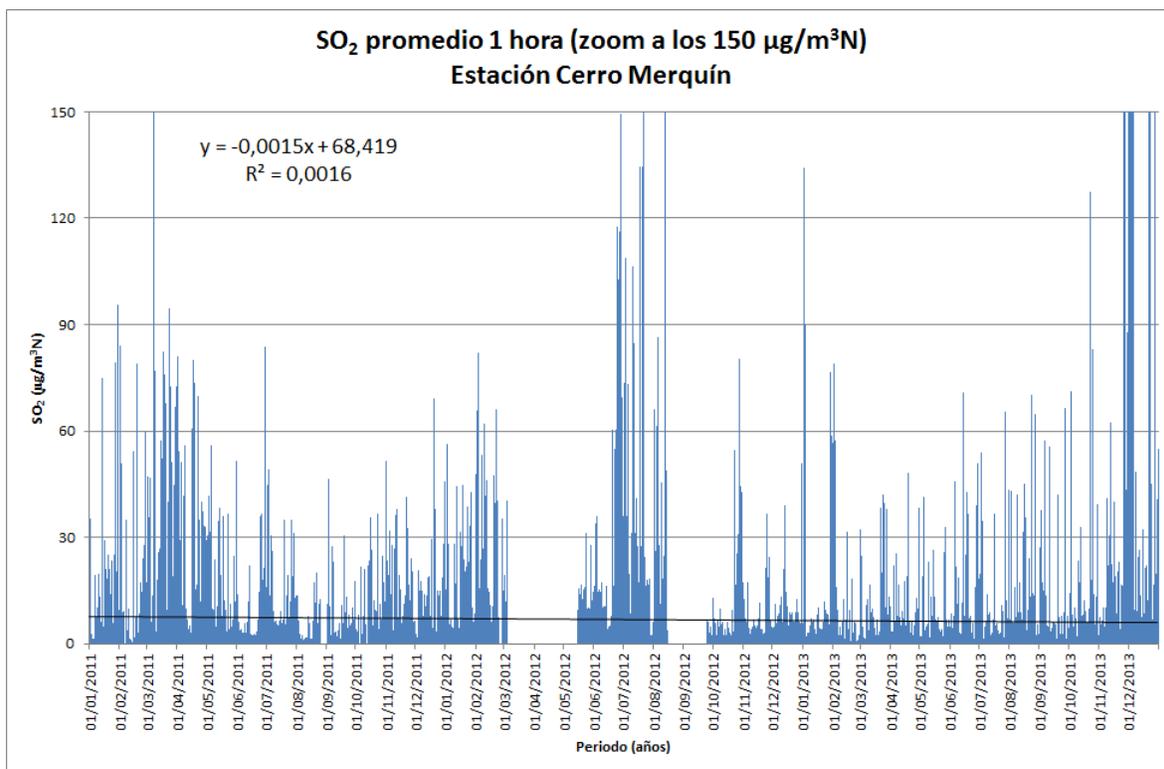
**Figura 98 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coronel Norte, Coronel, zoom a 250 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 250 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Coronel Norte, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



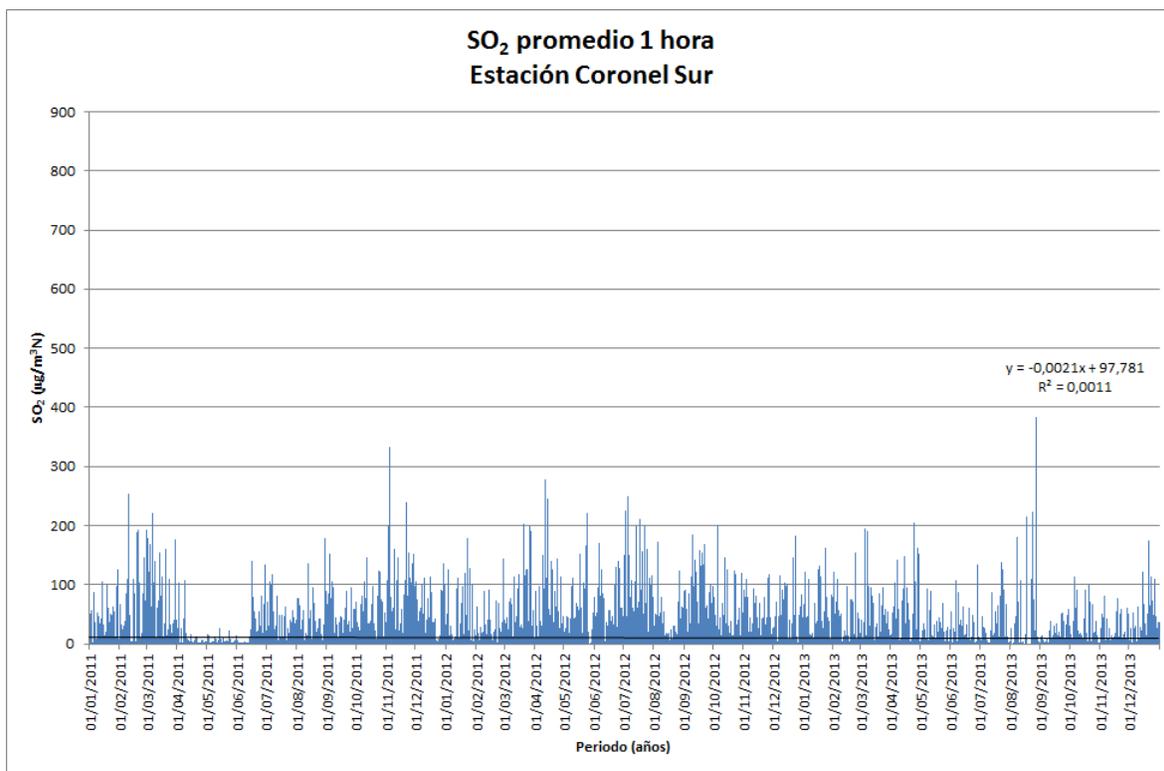
**Figura 99 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cerro Merquín, Coronel.**

Las concentraciones horarias en la estación Cerro Merquín muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 150 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 300 ó 400 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 01-12-2013, donde un valor horario alcanzó 446 µg/m<sup>3</sup>N.



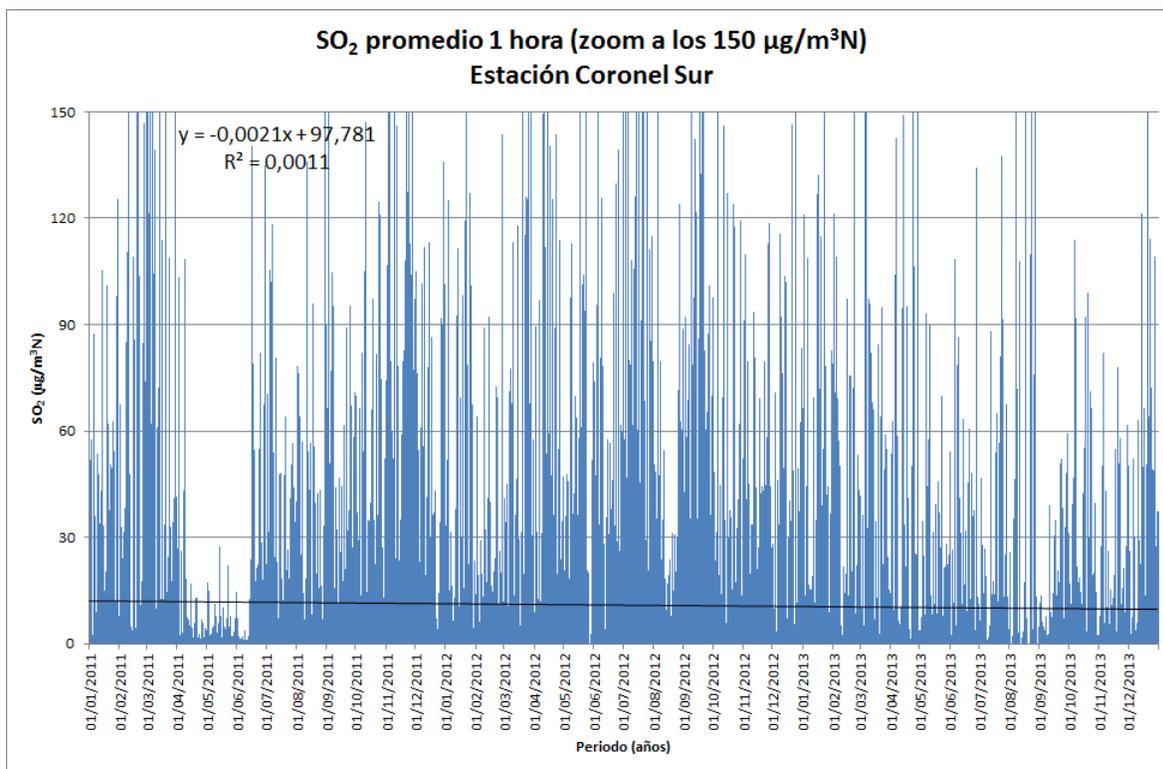
**Figura 100 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Cerro Merquín, Coronel, zoom a 150 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 150 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Cerro Merquín, muestran que existe muy poca variación en cuanto a tendencia de las concentraciones, sin embargo numéricamente la tendencia es negativa.



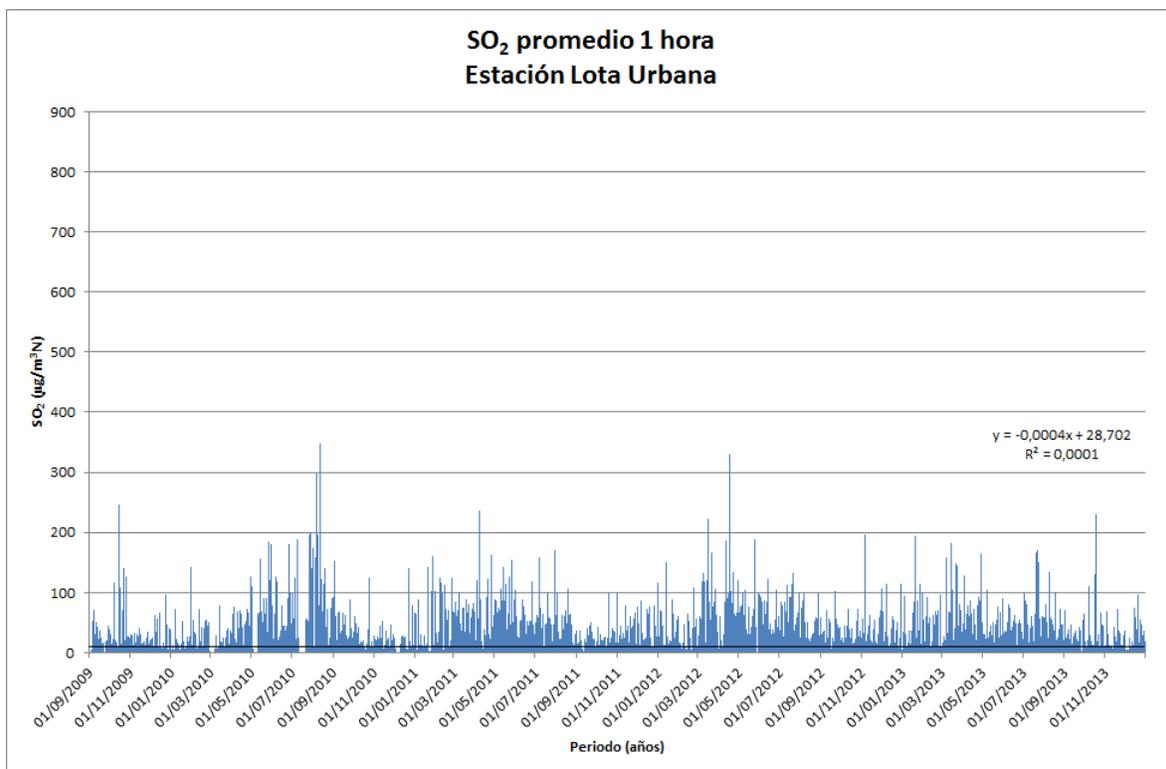
**Figura 101 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coronel Sur, Coronel.**

Las concentraciones horarias en la estación Coronel Sur muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 150 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 200 ó 300 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 27-08-2013, donde un valor horario alcanzó 384 µg/m<sup>3</sup>N.



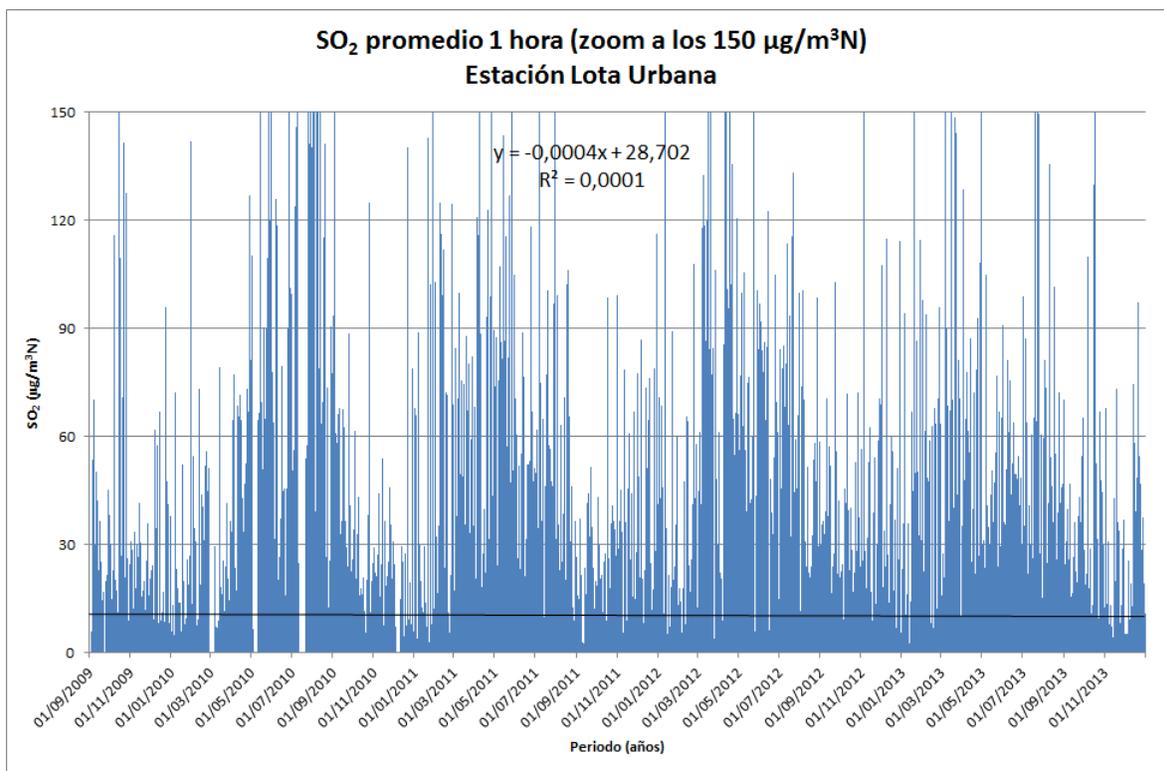
**Figura 102 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Coronel Sur, Coronel, zoom a 150 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 150 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Coronel Sur, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



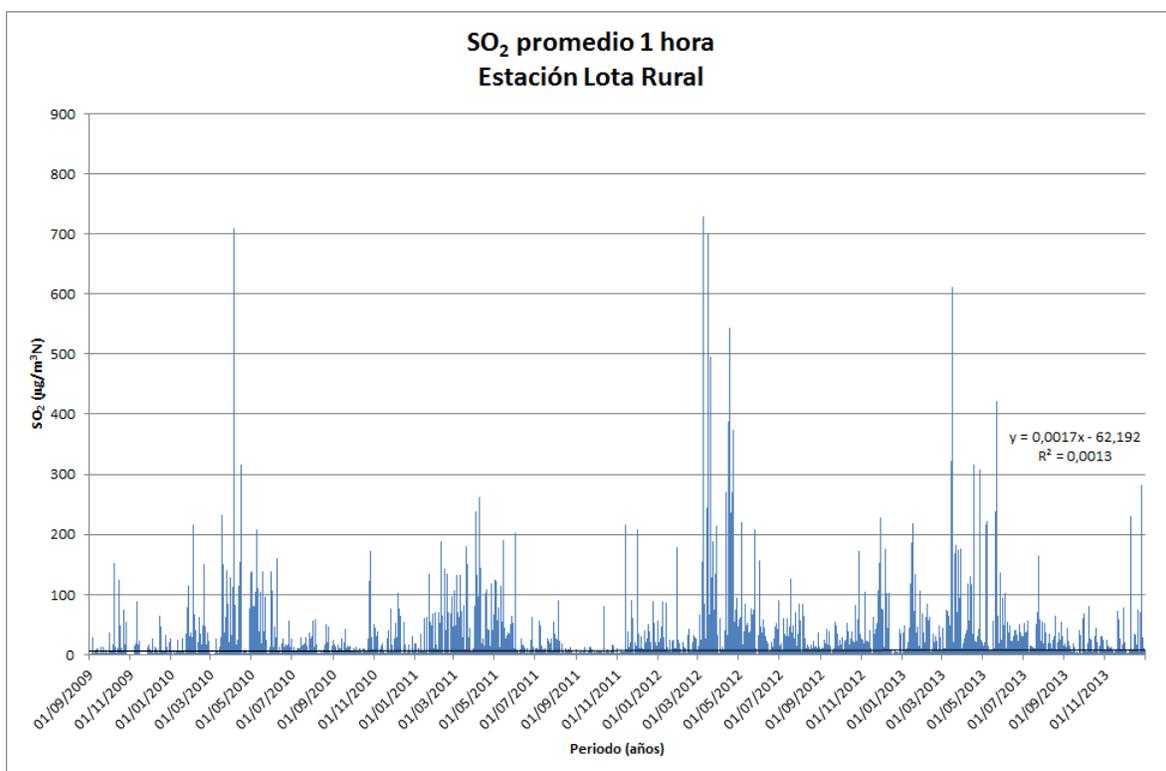
**Figura 103 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lota Urbana, Lota.**

Las concentraciones horarias en la estación Lota Urbana muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 150 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 200 ó 300 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 12-08-2010, donde un valor horario alcanzó 348 µg/m<sup>3</sup>N.



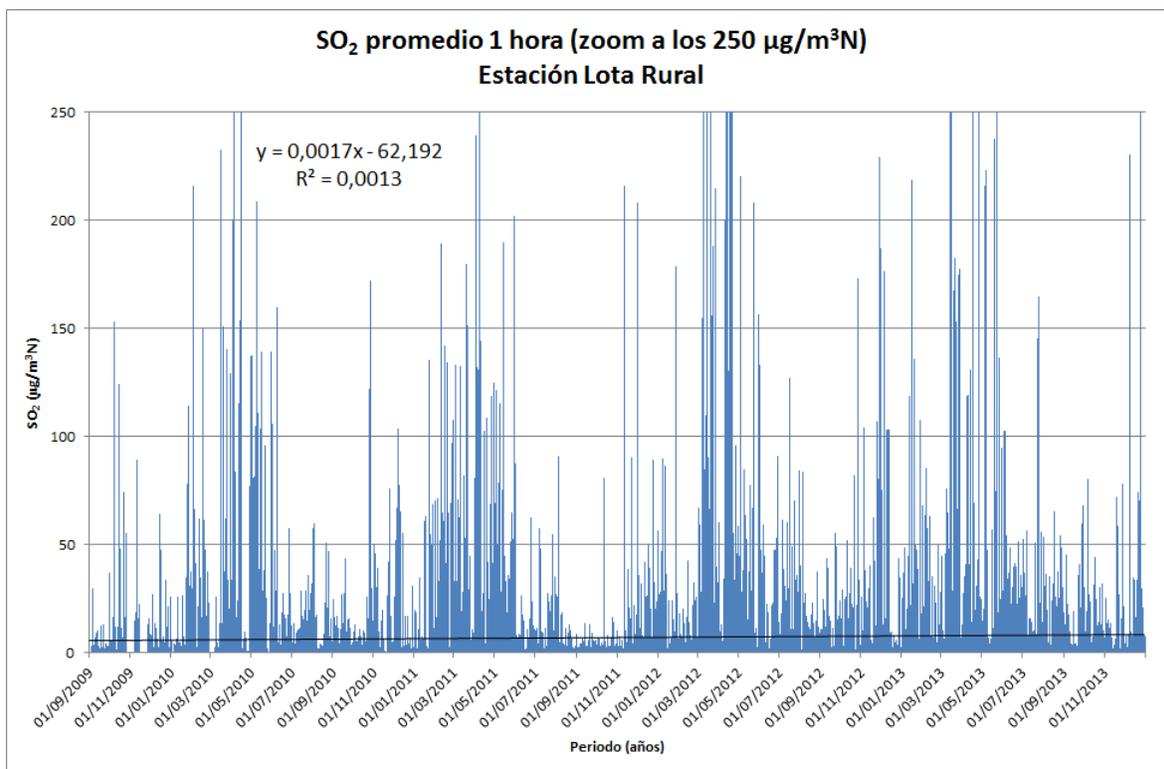
**Figura 104 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lota Urbana, Lota, zoom a 150 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 150 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Lota Urbana, muestran que existe una ligera tendencia a disminuir las concentraciones.



**Figura 105 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lota Rural, Lota.**

Las concentraciones horarias en la estación Lota Rural muestran que el grueso de las concentraciones se presenta bajo los 250 µg/m<sup>3</sup>N, no obstante se observa la presencia de peaks de concentraciones que superan los 600 ó 700 µg/m<sup>3</sup>N. El mayor peak registrado ocurrió el 08-03-2012, donde un valor horario alcanzó 729 µg/m<sup>3</sup>N.



**Figura 106 Promedio fijo de 1 hora de concentraciones de SO<sub>2</sub>. Estación Lota Rural, Lota, zoom a 250 µg/m<sup>3</sup>N.**

Las concentraciones horarias inferiores a 250 µg/m<sup>3</sup>N en la estación Lota Rural, muestran que existe una ligera tendencia a aumentar las concentraciones.

### 2.3.3. Análisis estadístico

A partir de los datos de concentración de  $\text{SO}_2$  de 1 hora se procedió a la obtención de los estadígrafos que dieran cuenta de la situación histórica de cada estación de calidad del aire considerada en el estudio. El objetivo de la obtención de esta estadística descriptiva es entregar una información clara y explícita de la situación de cada zona incorporada en el estudio a modo de obtener antecedentes que apoyen la correcta toma de decisiones en torno a la revisión de la norma primaria de calidad del aire para  $\text{SO}_2$ .

Los estadígrafos obtenidos del análisis corresponden a:

- Número de datos válidos
- Promedio
- Mínimo
- Máximo
- Desviación estándar
- Cuartiles 25, 50 y 75.
- Deciles 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
- Percentiles 95, 98 y 99.

A modo de ejemplo se muestra la estadística descriptiva y tablas de percentiles de las estaciones de Tocopilla (Tabla 4 y Tabla 5). Debido a la extensión de las tablas, los resultados para el resto de las estaciones se encuentran en el Anexo 2.

**Tabla 4. Estadística descriptiva estaciones de calidad del aire de Tocopilla (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

2010	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo
<i>E10</i>	---	---	---	---	---	---	---	---
<i>Gobernación</i>	8471	12	15	0	5	10	13	347

2011	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo
<i>E10</i>	8309	34	53	0	4	16	42	791
<i>Gobernación</i>	8272	7	9	0	3	4	9	177

2012	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo
<i>E10</i>	8664	64	99	0	8	29	80	1384
<i>Gobernación</i>	8711	14	20	1	4	7	13	258

2013	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo
<i>E10</i>	8647	96	132	0	11	46	129	1200
<i>Gobernación</i>	8617	8	11	2	4	5	8	224

**Tabla 5. Percentiles para estaciones de calidad del aire de Tocopilla (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

2010	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
<i>E10</i>												
<i>Gobernación</i>	2	3	6	8	10	11	13	15	21	30	48	70

2011	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
<b><i>E10</i></b>	1	3	6	10	16	23	35	52	84	128	196	<b>256</b>
<i>Gobernación</i>	1	2	3	3	4	6	8	10	14	19	31	44

2012	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
<b><i>E10</i></b>	2	6	11	18	29	44	66	100	164	234	375	<b>493</b>
<i>Gobernación</i>	3	4	5	6	7	9	11	17	30	48	80	105

2013	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
<b><i>E10</i></b>	3	7	15	28	46	71	106	159	254	358	507	<b>622</b>
<i>Gobernación</i>	3	3	4	5	5	6	8	10	15	25	41	54

### 2.3.4. Uso del percentil 99

La norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre (DS 113/02 MINSEGPRES) utiliza el percentil 99 de los últimos tres años como indicador de evaluación del cumplimiento de la norma diaria. El resto de las normas primarias de calidad del aire para gases también utiliza el percentil 99 para evaluar las respectivas normas (de acuerdo a la resolución temporal que cada una establece) (DS 112/03 MINSEGPRES; DS 114/03 MINSEGPRES; DS 115/02 MINSEGPRES). Debido a lo anterior, el percentil 99 es un estadígrafo ampliamente utilizado en las normas primarias de calidad del aire en Chile.

Para esta parte del estudio, se utilizará el promedio de los años 2011 a 2013 del percentil 99 para seleccionar las estaciones con las mayores concentraciones. Se considera el promedio de los últimos tres años, como una representación de la actualidad en cada una de las zonas estudiadas. Desde el año 2005 a la fecha, han existido cambios en las metodologías de trabajo industrial, que han mejorado en algunos casos, la calidad del aire, por lo que se desea observar la ventana de los últimos 3 años de mediciones.

Cabe destacar que el promedio del percentil 99 de los años 2011 y 2013 no se construye para realizar una evaluación de la norma de  $\text{SO}_2$ , si no para seleccionar a aquellas estaciones con las mayores concentraciones. Es por esto, que los resultados de esta sección no son comparables con las evaluaciones de la norma actual del  $\text{SO}_2$ . La metodología de validación, y procesamiento de los datos podría diferir con la actual evaluación de norma, tal como se describió en la sección Metodología de este capítulo y en el Anexo 3.

El segundo criterio para la selección de las estaciones, es la ubicación geográfica con respecto a los principales asentamientos de población en cada una de las zonas. Así si la estación con las mayores concentraciones (basadas en el promedio del percentil 99 entre 2011 y 2013) no se encuentra en las cercanías de la población, se selecciona la peor estación que sí se encuentre ubicada en el asentamiento poblacional. (Por ejemplo, la estación Coviefi en Antofagasta).

La Tabla 6 muestra los valores de percentil 99, obtenidos a partir de promedios horarios, para cada una de las estaciones de calidad del aire consideradas. Se muestra el valor para cada año disponible por estación así como también el promedio histórico y el promedio de los tres últimos años. En rojo se destacan las estaciones seleccionadas para continuar el estudio.

Tabla 6 Percentil 99 para estaciones de calidad del aire consideradas en el estudio

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Prom. hist.	Prom. 2011-2013
<b>TOCOPILLA</b>											
<b>Escuela - E10</b>	--	--	--	--	--	--	256	493	622	<b>457</b>	<b>457</b>
Gobernación	--	--	--	--	--	70	44	105	54	68	67,8
<b>CALAMA</b>											
Hospital	--	--	33	54	42	49	43	41	56	45	47
<b>SML</b>	--	--	26	34	30	32	41	49	71	<b>40</b>	<b>54</b>
<b>MEJILLONES</b>											
Ferrocarril	--	--	--	--	--	--	29	55	53	46	46
JJ Latorre	--	--	--	--	--	--	58	77	82	72	72
<b>Sub Eléctrica</b>	--	--	--	--	--	--	65	105	102	<b>90</b>	<b>90</b>
<b>ANTOFAGASTA - LA NEGRA</b>											
<b>Coviefi</b>	--	--	--	--	57	16	8	11	18	<b>22</b>	<b>12</b>
Norte	--	--	--	--	128	12	234	58	266	140	186
<b>Sur</b>	--	--	--	--	1831	3429	1412	862	1196	<b>1746</b>	<b>1157</b>
<b>COPIAPÓ - PAIPOTE - TIERRA AMARILLA</b>											
Copiapó	--	--	--	--	--	59	38	89	206	98	111
Los Volcanes	--	--	--	--	--	75	131	161	317	171	203
Pabellón	--	--	--	--	--	54	43	50	195	85	96
<b>Paipote</b>	--	--	--	--	--	521	462	498	859	<b>585</b>	<b>607</b>
San Fernando	--	--	--	--	--	48	46	86	158	84	96
<b>Tierra Amarilla</b>	--	--	--	--	--	186	269	329	448	<b>308</b>	<b>349</b>
<b>HUASCO</b>											
SM1 Vertedero	151	87	78	140	180	132	142	153	95	129	130
SM2 Quinta La Rosa	165	145	140	184	166	79	49	85	81	121	72
<b>SM3 Cía. Bomberos</b>											
<b>Huasco Bajo</b>	181	135	163	202	199	146	124	170	161	<b>164</b>	<b>151</b>
SM4 Carretera Km 40	177	110	98	148	162	161	110	166	147	142	141
SM5 Parcela 5 El Pino	143	146	108	159	142	137	115	134	130	135	126
SM6 Parcela Buena											
Esperanza	144	95	88	145	136	141	102	138	126	124	122
SM7 Los Loros	155	134	219	209	138	130	109	124	131	150	121
SM8 Freirina	59	44	53	85	158	104	98	107	119	92	108
<b>SM9 Escuela JM Carrera</b>	134	89	91	148	190	168	143	199	163	<b>147</b>	<b>168</b>
SM10 Cuerpo Bomberos											
EME	138	116	83	142	194	140	126	192	155	143	158
<b>CATEMU - LLAY LLAY</b>											
Catemu	--	--	--	--	106	96	109	87	89	97	95
Lo Campo	--	--	--	--	217	213	245	224	246	229	238
<b>Santa Margarita</b>	--	--	--	--	370	408	425	375	395	<b>394</b>	<b>398</b>
Romeral	--	--	--	--	110	120	115	112	130	117	119
<b>QUINTERO - PUCHUNCAVÍ</b>											
La Greda	164	276	284	388	271	309	155	182	242	252	193
<b>Los Maitenes</b>	406	547	628	710	589	449	392	324	355	<b>489</b>	<b>357</b>

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Prom. hist.	Prom. 2011-2013
<i>Puchuncaví</i>	151	224	240	270	201	136	132	123	150	181	135
<i>Quintero</i>	--	--	--	--	74	189	267	386	388	261	347
<i>Sur</i>	297	399	428	498	330	449	330	258	150	349	246
<i>Valle Alegre</i>	129	179	184	247	194	75	102	86	388	176	192
<i>Ventanas</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	234	234	234
<b><i>GNL Quintero</i></b>	--	--	--	--	--	1475	1799	988	388	<b>1163</b>	<b>1059</b>
<b>MACHALÍ - COYA</b>											
<b><i>Coya Club</i></b>	549	812	768	545	651	627	431	381	322	<b>565</b>	<b>378</b>
<i>Coya Población</i>	158	209	212	141	180	187	126	103	70	154	100
<i>Cauquenes</i>	100	158	161	79	131	158	87	92	66	115	82
<i>Cipreses</i>	97	132	120	94	112	114	63	76	55	96	65
<b>CORONEL - LOTA - HUALPÉN - TALCAHUANO</b>											
<b><i>Junji</i></b>	290	271	330	342	246	134	121	133	155	<b>225</b>	<b>136</b>
<i>Inpesca</i>	145	161	123	162	129	71	66	59	61	109	62
<i>Indura</i>	--	277	170	148	116	74	--	71	60	131	65
<i>PRICE</i>	--	--	--	--	144	75	70	92	113	99	92
<i>CAP</i>	--	--	--	--	148	170	65	94	83	112	81
<i>Coronel Sur</i>	--	--	--	--	83	--	97	119	83	95	100
<i>Coronel Norte</i>	--	--	--	--	155	--	178	178	155	166	170
<i>Lagunillas</i>	--	--	--	--	75	44	93	80	75	73	83
<i>Cerro Merquín</i>	--	--	--	--	59	--	46	61	59	56	55
<i>Lota Urbana</i>	--	--	--	--	70	110	86	83	70	84	80
<i>Lota Rural</i>	--	--	--	--	84	82	81	125	84	91	97

### 2.3.5. Análisis Meteorológico

La resolución temporal de los datos de meteorología utilizados corresponde a promedios de 1 hora. Por lo tanto, para ser consistentes con el análisis, se cruzó esta información con datos de concentración de SO<sub>2</sub> en la misma resolución temporal.

El análisis meteorológico considera un análisis de peaks en las zonas priorizadas, para esto se definió un peak como la concentración de SO<sub>2</sub>, en promedios de 1 hora, que supera el valor normativo evaluado más estricto en la misma resolución temporal, es decir, 197 µg/m<sup>3</sup>N (ver Tabla 55).

Se analizan las concentraciones de SO<sub>2</sub> en función de la meteorología. Para esto se analiza la dirección y velocidad del viento como medio de transporte del dióxido de azufre.

El análisis considera el supuesto de que las emisiones de SO<sub>2</sub> son constantes en el tiempo y que los aumentos en las concentraciones son producto de los cambios en la dirección y velocidad del viento. Como se mencionó anteriormente, este supuesto se considera porque no se tiene información de los procesos industriales en cada una de las zonas estudiadas, así, si las concentraciones aumentan bruscamente producto de alguna operación industrial, el aumento será atribuido a las condiciones meteorológicas imperantes y no al aumento en las emisiones de SO<sub>2</sub>.

Para el análisis se seleccionaron las estaciones que entregan el peor escenario de cada zona priorizada, para esto se eligieron aquellas que presentaron el mayor promedio histórico y el mayor promedio 2011-2013 de los valores del percentil 99 obtenidos del análisis estadístico (Tabla 6), utilizando la información de meteorología de la misma estación o de una estación cercana que represente el comportamiento del viento en la zona.

Para la velocidad del viento, se utilizará la siguiente tabla de velocidades, basada en la Escala Beaufort

**Tabla 7. Estimación de la Velocidad del Viento basada en la Escala Beaufort**

Velocidad del Viento (m/s)	Denominación
0 – 0.3	Calma
0.3 – 3	Débil
3 – 6	Ligero
6 – 10	Moderado
> 10	Fuerte

Para el análisis se grafica el viento y las concentraciones en 6 gráficos utilizando los datos horarios de meteorología y concentraciones de los últimos tres años (2011-2013),

para representar las concentraciones actuales, utilizando el software Windographer. En los gráficos que presenta lo siguiente:

(a) Muestra la dirección del viento en porcentajes de frecuencia para todas horas del periodo de estudio (2011-2013).

(b) Muestra la dirección del viento en porcentajes de frecuencia para aquellas horas en que las concentraciones de  $\text{SO}_2$  igualen o superen los  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  (peaks de  $\text{SO}_2$ ).

(c) Muestra las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  distribuidas por dirección del viento para todas las horas del periodo de estudio.

(d) Muestra las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  distribuidas por dirección del viento para aquellas horas con peaks de  $\text{SO}_2$ .

(e) Muestra la velocidad del viento en metros sobre segundo (m/s) en función de la dirección del viento.

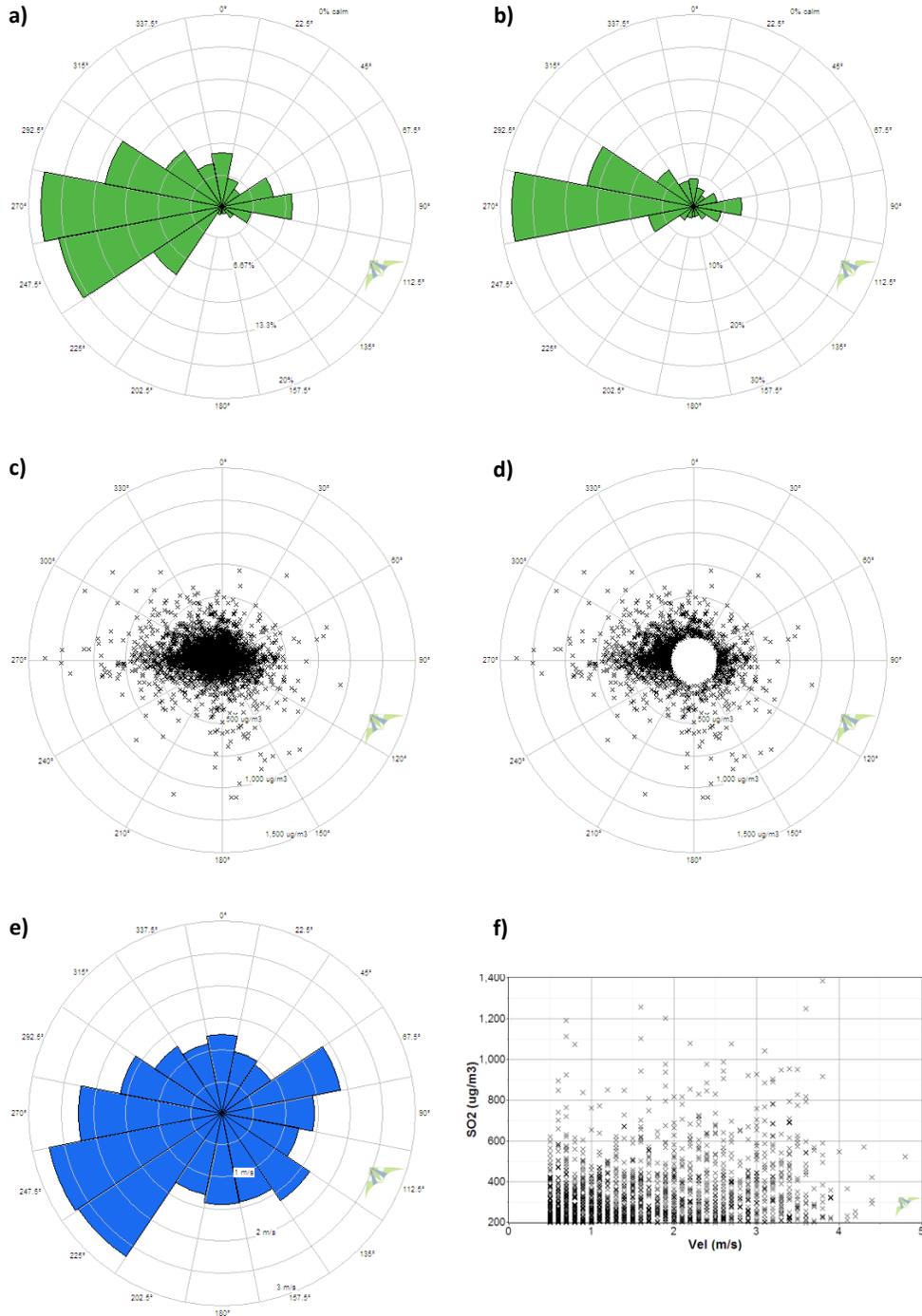
(f) Muestran los peaks de  $\text{SO}_2$  en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en el eje "y" versus la velocidad del viento (en m/s) en el eje "x"<sup>13</sup>.

Con esta forma de presentar la información es posible observar el comportamiento medio del viento, independiente de las concentraciones de  $\text{SO}_2$ , y además observar las condiciones del viento en horas con altas concentraciones de  $\text{SO}_2$ .

---

<sup>13</sup> La información de este párrafo es común para los gráficos de todas las zonas.

**i) TOCOPILLA. ESTACIÓN E-10 (meteorología y concentraciones)**



**Figura 107. Análisis meteorológico, Tocopilla, estación Escuela E-10, 2011-2013**

En la estación E-10 la dirección predominante, en (a), es oeste, y en segunda medida noroeste y suroeste, al momento de presentarse peak de SO<sub>2</sub> la dirección predominante es oeste, en (b). Se observan, en (c) altas concentraciones de SO<sub>2</sub> es casi todas las direcciones, no obstante los peaks altos, en (d) provienen mayormente desde el oeste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> no presentan un rango definido de intensidad del viento, pudiendo producirse peaks entre los 0,5 y 4 m/s aproximadamente.

**Tabla 8. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación E-10**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	29,6	722,8	1,1	3,7
11.25° - 33.75°	34,7	603,7	0,9	3,7
33.75° - 56.25°	42,0	837,7	0,8	4,1
56.25° - 78.75°	33,4	853,4	1,6	7,4
78.75° - 101.25°	36,6	658,6	1,2	5,6
101.25° - 123.75°	40,1	941,0	1,0	5,1
123.75° - 146.25°	42,3	922,7	1,1	5,7
146.25° - 168.75°	73,0	903,4	1,0	4,3
168.75° - 191.25°	93,2	1074,5	1,0	3,6
191.25° - 213.75°	56,1	1111,1	0,9	4,7
213.75° - 236.25°	4,7	914,8	2,6	5,9
236.25° - 258.75°	8,9	828,6	2,8	6,4
258.75° - 281.25°	27,1	1383,5	2,2	5,3
281.25° - 303.75°	41,5	1199,5	1,6	4,8
303.75° - 326.25°	34,8	1100,3	1,2	3,9
326.25° - 348.75°	28,3	617,7	1,0	4,2

En la tabla se puede apreciar que las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan con direcciones del viento predominantes del oeste, entre suroeste y noroeste.

ii) CALAMA. ESTACION SERVICIO MEDICO LEGAL (meteorología y concentraciones)

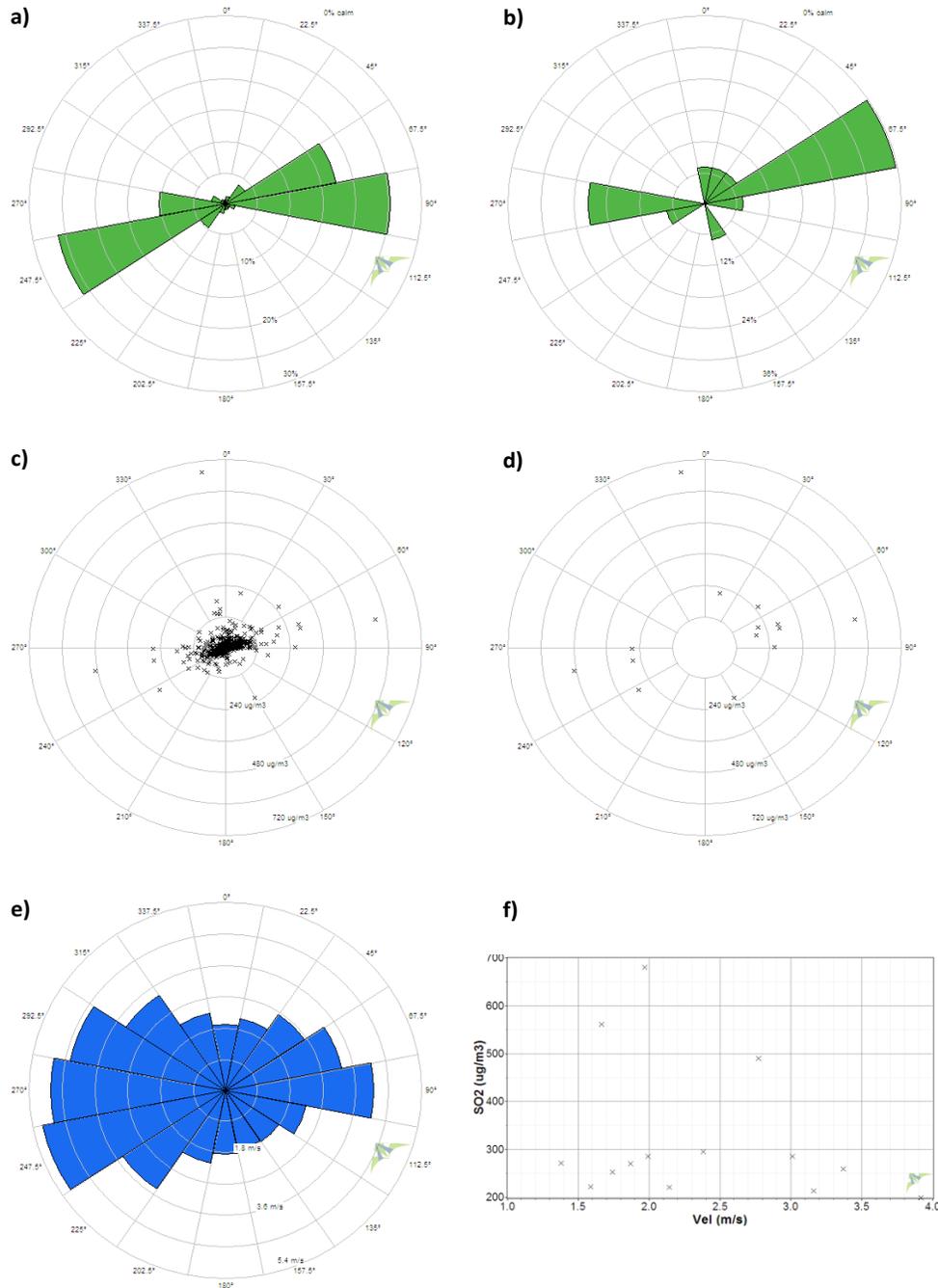


Figura 108. Análisis meteorológico, zona Calama, estación Servicio Médico Legal, 2012-2013

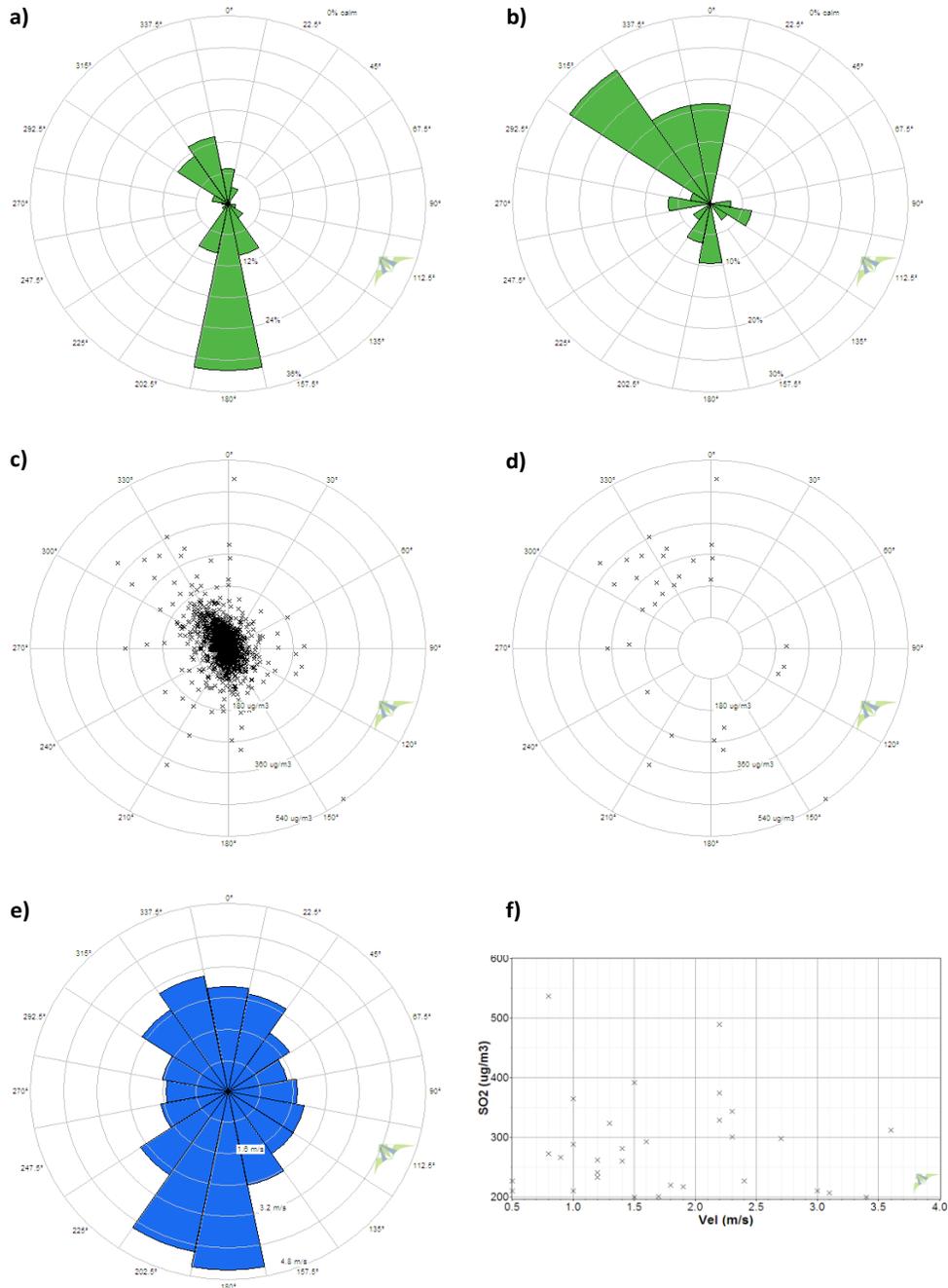
En la estación SML se puede apreciar, en (a) que la dirección predominante del viento es noreste y en segundo lugar suroeste, no obstante la dirección predominante al momento de las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub>, en (b), es del noreste. Sin embargo los mayores peak de SO<sub>2</sub>, en (d), provienen tanto del norte (un peak) suroeste y noreste, lo que quiere decir que si bien existe una dirección prevaleciente desde donde viene el SO<sub>2</sub> a la estación, éste también puede provenir de otras direcciones. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan desde el oeste-suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan con velocidades entre los 1,5 y 3 m/s aproximadamente, en (f).

**Tabla 9. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Servicio Médico Legal**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	3,1	680,6	1,8	7,1
11.25° - 33.75°	2,8	219,8	2,0	8,1
33.75° - 56.25°	2,2	251,4	2,5	6,5
56.25° - 78.75°	2,3	560,8	3,2	7,0
78.75° - 101.25°	2,1	258,2	4,1	8,0
101.25° - 123.75°	1,4	81,0	2,0	5,3
123.75° - 146.25°	1,6	84,3	1,8	3,5
146.25° - 168.75°	1,3	221,6	1,8	3,3
168.75° - 191.25°	0,9	67,2	1,8	3,1
191.25° - 213.75°	0,5	99,7	2,1	5,1
213.75° - 236.25°	0,9	130,2	3,1	7,6
236.25° - 258.75°	1,5	294,6	5,4	8,3
258.75° - 281.25°	0,6	489,8	5,2	8,3
281.25° - 303.75°	0,3	117,4	4,7	8,6
303.75° - 326.25°	0,6	84,2	2,1	9,9
326.25° - 348.75°	2,7	145,1	1,7	8,1

En la tabla se puede apreciar que los mayores peaks de SO<sub>2</sub> se presentan con vientos predominantes del norte-noreste, tal como se mencionó anteriormente, y en segundo lugar desde el sureste.

**iii) MEJILLONES. ESTACIÓN SUBESTACIÓN ELÉCTRICA (meteorología y concentraciones)**



**Figura 109. Análisis meteorológico, zona Mejillones, estación Subestación Eléctrica, 2011-2013**

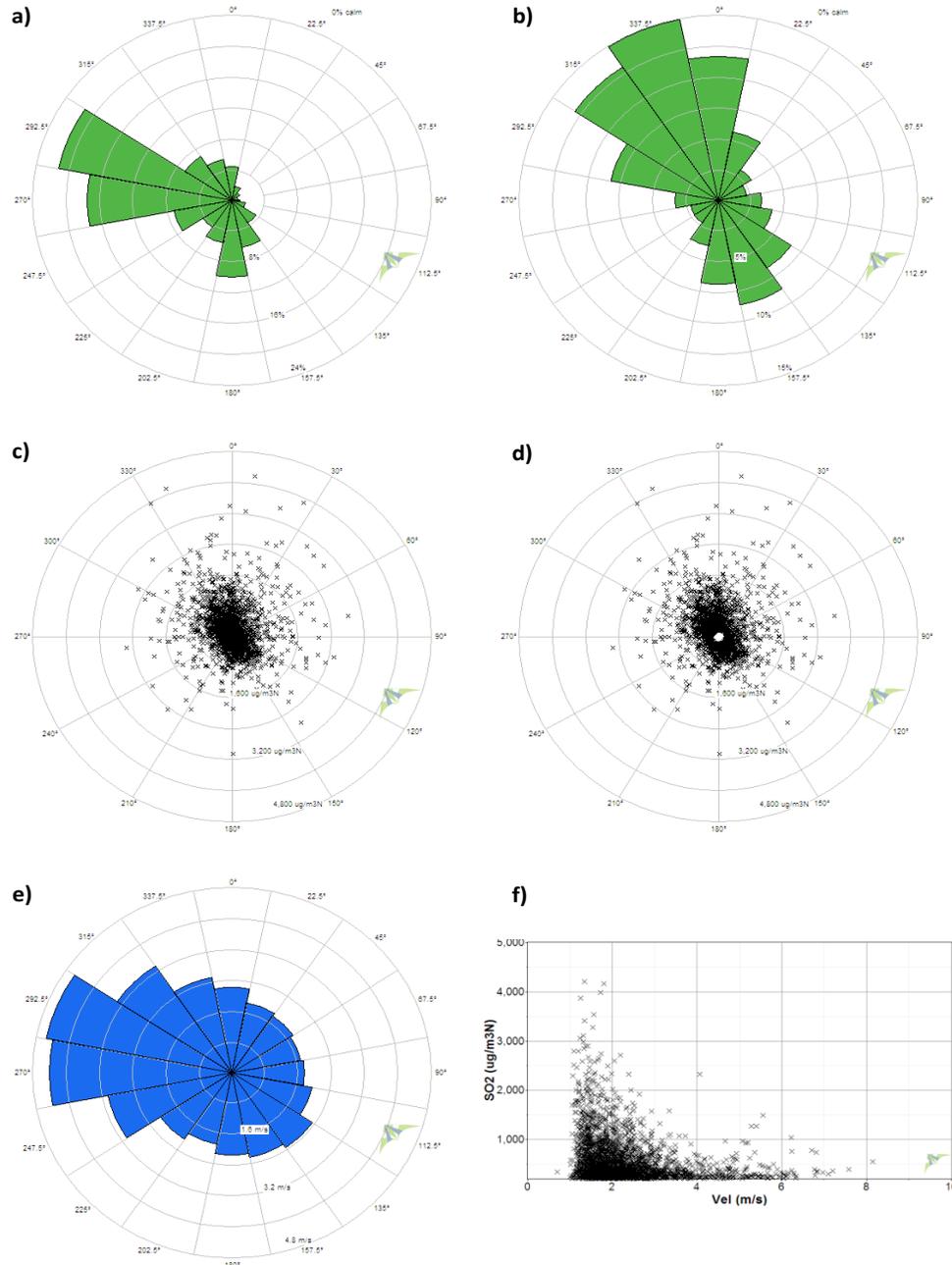
En la estación Subestación Eléctrica la dirección predominante es sur y en segunda medida noroeste como se observa en (a), al momento de presentarse peaks de SO<sub>2</sub> la dirección predominante es noroeste, como se observa en (b). Por otro lado en (c), se observa que las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> se producen con viento de dirección noroeste mayormente, lo que se ratifica en la figura (d), sin embargo, se aprecian algunos peaks aislados de dirección sureste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección sur, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 0,8 y 2,5 m/s.

**Tabla 10. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Subestación Eléctrica**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	10,6	489,5	2,7	5,7
11.25° - 33.75°	10,7	146	2,5	6,1
33.75° - 56.25°	9,7	141,5	1,6	5
56.25° - 78.75°	9,9	188,3	1,2	4,7
78.75° - 101.25°	8,2	209,8	1,4	4,9
101.25° - 123.75°	7,5	210,6	1,7	5,8
123.75° - 146.25°	4,1	536,5	1,8	5,6
146.25° - 168.75°	1,9	189,4	2,3	9,8
168.75° - 191.25°	1,3	293	4,3	13
191.25° - 213.75°	1,5	374,5	3,8	9,8
213.75° - 236.25°	4,3	217,3	1,7	14,4
236.25° - 258.75°	5,4	143,8	1,2	5,2
258.75° - 281.25°	7,1	281,7	1,2	5,4
281.25° - 303.75°	5,8	219,9	1,5	5,1
303.75° - 326.25°	5,2	392,2	2,6	5,4
326.25° - 348.75°	7	365	3,2	5,8

El mayor peak de SO<sub>2</sub> observado en la tabla resumen, proviene de dirección sureste, no obstante, las mayores concentraciones provienen en general de dirección noroeste.

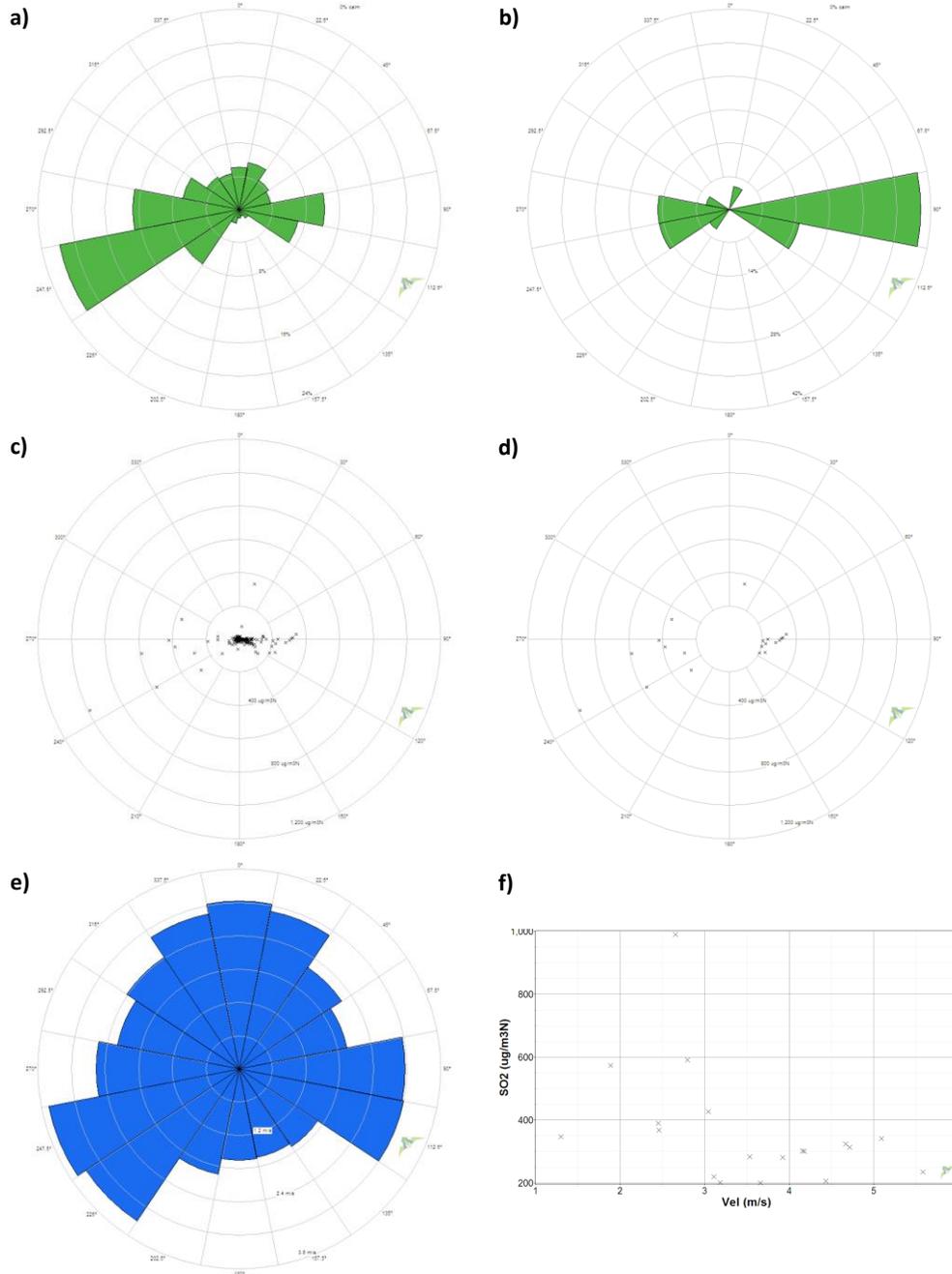
**iv) a.- ANTOFAGASTA - LA NEGRA. ESTACIÓN SUR (meteorología y concentraciones)**



**Figura 110. Análisis meteorológico, zona Antofagasta-La Negra, estación Sur, 2011-2013**

En la estación Sur la dirección predominante del viento es oeste-noroeste, y en segunda medida sur en un porcentaje más bajo, como se observa en (a), al momento de presentarse peaks de SO<sub>2</sub> la dirección predominante es noroeste y en segunda medida sureste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente norte, sin embargo, las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> (peaks superiores a los 197 µg/m<sup>3</sup>) se aprecian de dirección norte-noreste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección oeste-noroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 1 y 2 m/s.

**iv) b.- ANTOFAGASTA – LA NEGRA. ESTACIÓN COVIEFI (meteorología y concentraciones)**



**Figura 111. Análisis meteorológico, zona Antofagasta-La Negra, estación Coviefi, 2011-2013**

En la estación Coviefi la dirección predominante es suroeste, y en segunda medida este, como se observa en (a). Al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> la dirección predominante es oeste y en segunda medida sureste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente oeste, observándose también que el aire más limpio proviene desde el sur, los peaks de SO<sub>2</sub>, sin embargo en (d), se observa que los peak de mayor intensidad provienen desde el suroeste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección suroeste, norte y sureste en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades inferiores a los 3 m/s.

**Tabla 11. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Sur**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	40,7	4209,0	2,1	7,0
11.25° - 33.75°	50,9	3874,2	1,8	4,9
33.75° - 56.25°	52,3	2981,1	1,6	6,2
56.25° - 78.75°	55,9	2127,3	1,6	4,1
78.75° - 101.25°	86,5	2846,5	1,6	4,9
101.25° - 123.75°	57,5	2505,0	1,8	5,4
123.75° - 146.25°	39,7	2794,7	2,1	8,9
146.25° - 168.75°	18,4	1732,7	2,0	9,1
168.75° - 191.25°	7,4	3051,7	2,1	5,8
191.25° - 213.75°	2,2	2139,2	1,9	4,2
213.75° - 236.25°	0,0	2459,4	2,0	8,4
236.25° - 258.75°	0,0	2322,9	2,8	9,5
258.75° - 281.25°	0,0	2578,0	4,4	9,9
281.25° - 303.75°	0,2	2586,6	4,7	8,9
303.75° - 326.25°	32,8	2788,9	3,0	8,1
326.25° - 348.75°	51,6	4161,1	2,3	8,2

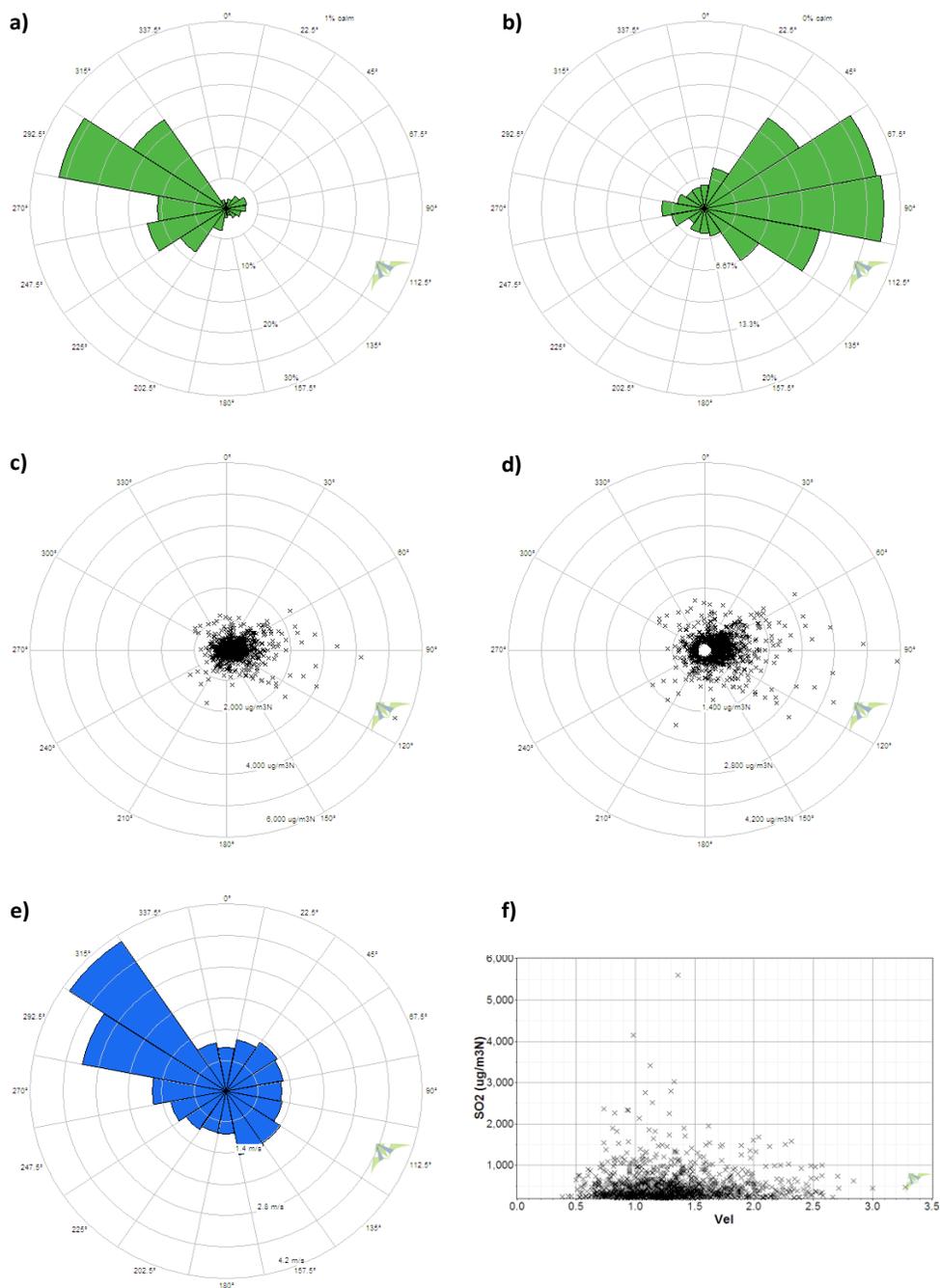
En la tabla se puede apreciar que la componente norte es la causante de las alzas en las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la estación Sur, tanto constantes (reflejadas en la mediana) como puntuales (máximos de SO<sub>2</sub>).

Para Coviefi, se puede apreciar que entre suroeste y noroeste se presentan las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub>.

**Tabla 12. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Coviefi**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	0.0	23.0	2.7	8.4
11.25° - 33.75°	0.0	346.8	2.5	8.6
33.75° - 56.25°	0.0	0.7	2.0	6.8
56.25° - 78.75°	0.0	20.1	1.8	7.1
78.75° - 101.25°	0.0	340.8	2.8	7.1
101.25° - 123.75°	0.0	229.3	2.9	7.0
123.75° - 146.25°	0.0	144.1	1.6	5.7
146.25° - 168.75°	0.0	26.1	1.5	5.1
168.75° - 191.25°	0.0	64.9	1.5	4.8
191.25° - 213.75°	0.0	22.5	1.7	5.7
213.75° - 236.25°	0.0	299.6	3.3	6.9
236.25° - 258.75°	0.0	990.2	3.5	7.2
258.75° - 281.25°	0.0	590.1	2.6	5.8
281.25° - 303.75°	0.0	367.0	2.2	5.5
303.75° - 326.25°	0.0	29.5	2.3	6.1
326.25° - 348.75°	0.0	4.0	2.5	8.0

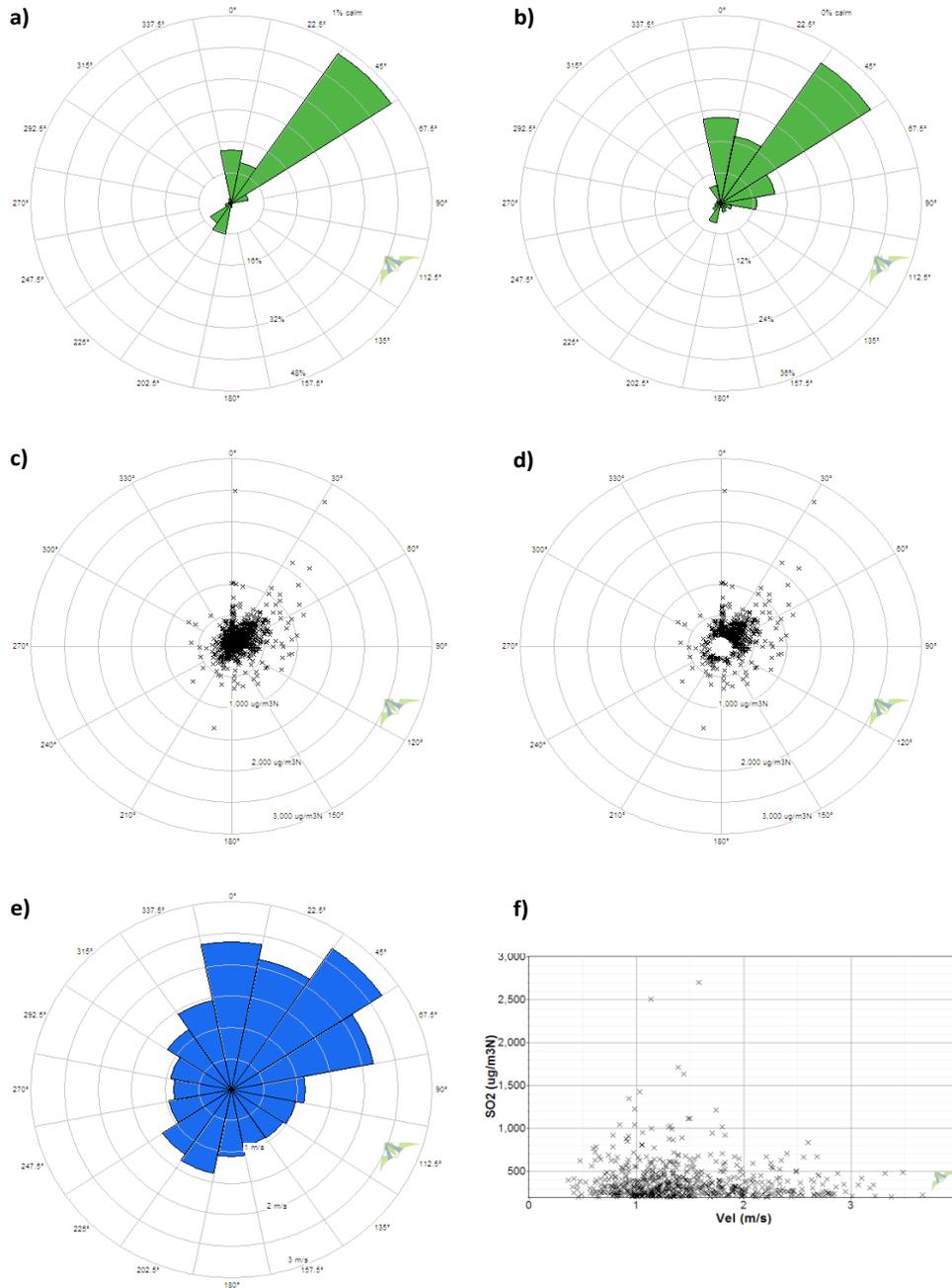
**v) a.- COPIAPÓ – PAIPOTE – TIERRA AMARILLA. ESTACIÓN PAIPOTE (meteorología y concentraciones)**



**Figura 112. Análisis meteorológico, zona Paipote, estación Paipote, 2011-2013**

En la estación Paipote la dirección predominante del viento es noroeste-oeste, en (a), mientras que al momento de presentarse los peaks de  $\text{SO}_2$  la dirección predominante es este, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de  $\text{SO}_2$  tienen mayormente una componente este, asimismo las mayores concentraciones de  $\text{SO}_2$  (peaks superiores a los  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se aprecian también desde el este. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan de dirección noroeste, en (e), mientras que los peaks de  $\text{SO}_2$  se presentan mayormente con velocidades entre los 0,6 y 1,6 m/s.

**v) b.- COPIAPÓ – PAIPOTE – TIERRA AMARILLA. ESTACIÓN TIERRA AMARILLA (meteorología y concentraciones)**



**Figura 113. Análisis meteorológico, zona Paipote, estación Tierra Amarilla, 2011-2013**

Para la estación Tierra Amarilla la dirección predominante del viento es noreste, y en segunda medida norte, como se observa en (a). Al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> la dirección predominante se mantiene noreste-norte, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente noreste, lo que se refleja en (d) con las mayores concentraciones provenientes también del noreste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con noreste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 0,8 y 1,8 m/s, como se puede apreciar en (f).

**Tabla 13. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Paipote**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	1,8	1149,7	1,0	2,7
11.25° - 33.75°	8,5	1110,0	1,0	3,7
33.75° - 56.25°	32,6	1579,9	1,3	3,2
56.25° - 78.75°	44,3	2328,0	1,2	2,7
78.75° - 101.25°	51,0	4144,7	1,2	2,9
101.25° - 123.75°	46,6	5597,6	1,2	3,1
123.75° - 146.25°	19,4	2363,8	1,3	4,7
146.25° - 168.75°	10,7	916,0	1,2	4,9
168.75° - 191.25°	0,0	1140,7	0,9	3,1
191.25° - 213.75°	0,0	1817,4	0,9	3,5
213.75° - 236.25°	0,0	1381,7	1,0	5,1
236.25° - 258.75°	0,0	745,0	1,2	5,4
258.75° - 281.25°	0,0	817,3	1,4	5,6
281.25° - 303.75°	0,0	1179,8	3,2	7,3
303.75° - 326.25°	0,0	1227,0	4,6	7,4
326.25° - 348.75°	0,2	1004,0	1,1	3,6

**Tabla 14. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Tierra Amarilla**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	2,6	2508,1	2,2	5,3
11.25° - 33.75°	2,9	2699,9	1,9	4,9
33.75° - 56.25°	2,3	1714,3	2,7	5,5
56.25° - 78.75°	2,7	1225,8	1,9	4,8
78.75° - 101.25°	42,3	999,3	1,1	3,0
101.25° - 123.75°	15,3	843,3	1,0	2,0
123.75° - 146.25°	9,5	624,6	0,9	2,0
146.25° - 168.75°	7,2	720,9	0,9	1,8
168.75° - 191.25°	3,2	684,2	1,0	2,3
191.25° - 213.75°	2,1	1345,9	1,4	3,2
213.75° - 236.25°	1,8	807,0	1,2	3,5
236.25° - 258.75°	2,3	510,1	0,8	2,4
258.75° - 281.25°	3,9	625,9	0,9	3,2
281.25° - 303.75°	2,8	768,3	0,8	3,7
303.75° - 326.25°	2,8	258,0	0,9	2,9
326.25° - 348.75°	3,2	593,7	1,1	5,0

En la tabla resumen para la estación Paipote se puede apreciar que las mayores concentraciones se presentan con vientos de componente este. Mientras que en Tierra Amarilla, las mayores concentraciones provienen desde noreste.

vi) a.- HUASCO. SM1 ESTACIÓN CARRETERA KM 40 (meteorología) y SM9 COMPAÑÍA DE BOMBEROS HUASCO BAJO (concentraciones)

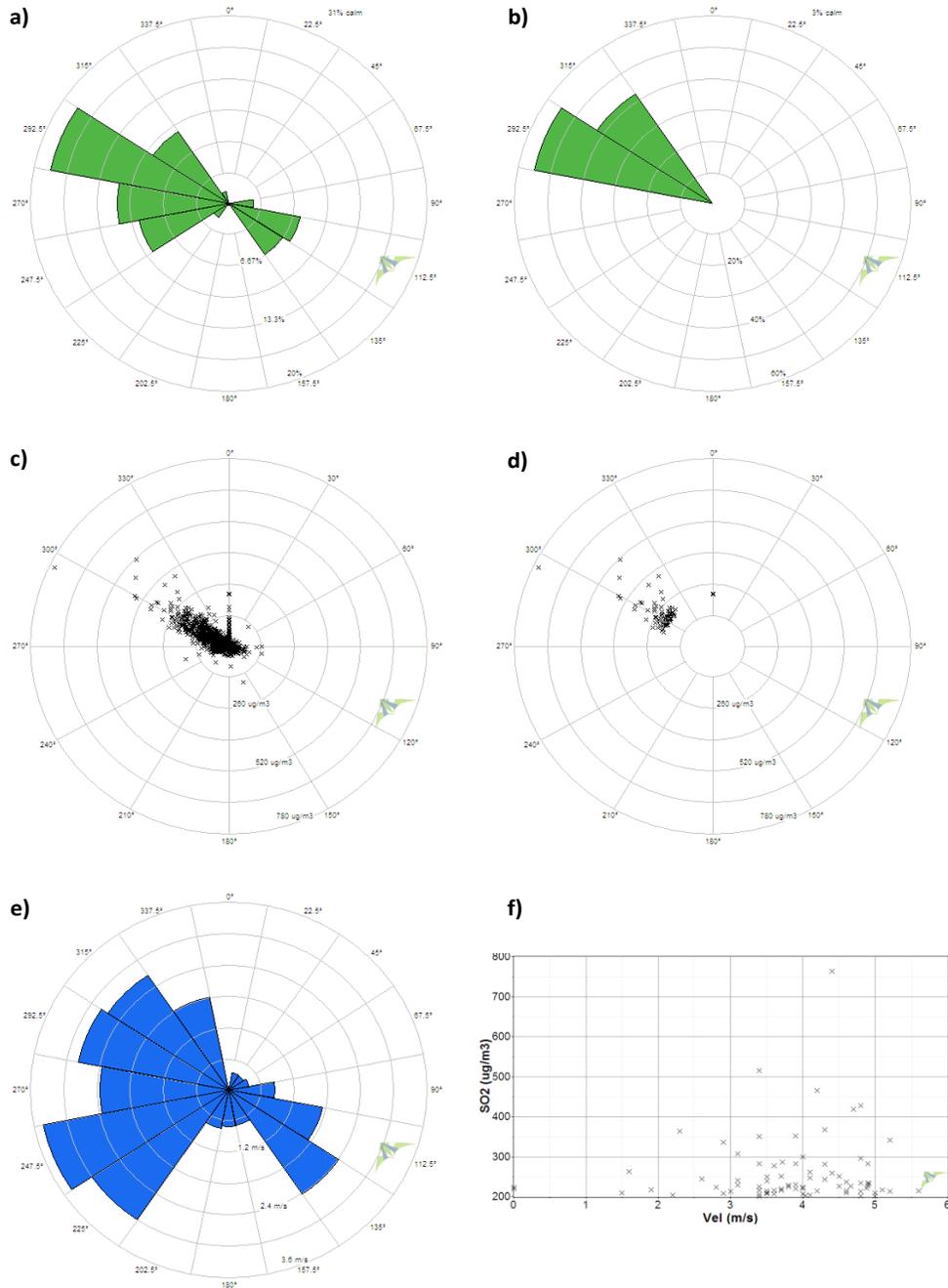
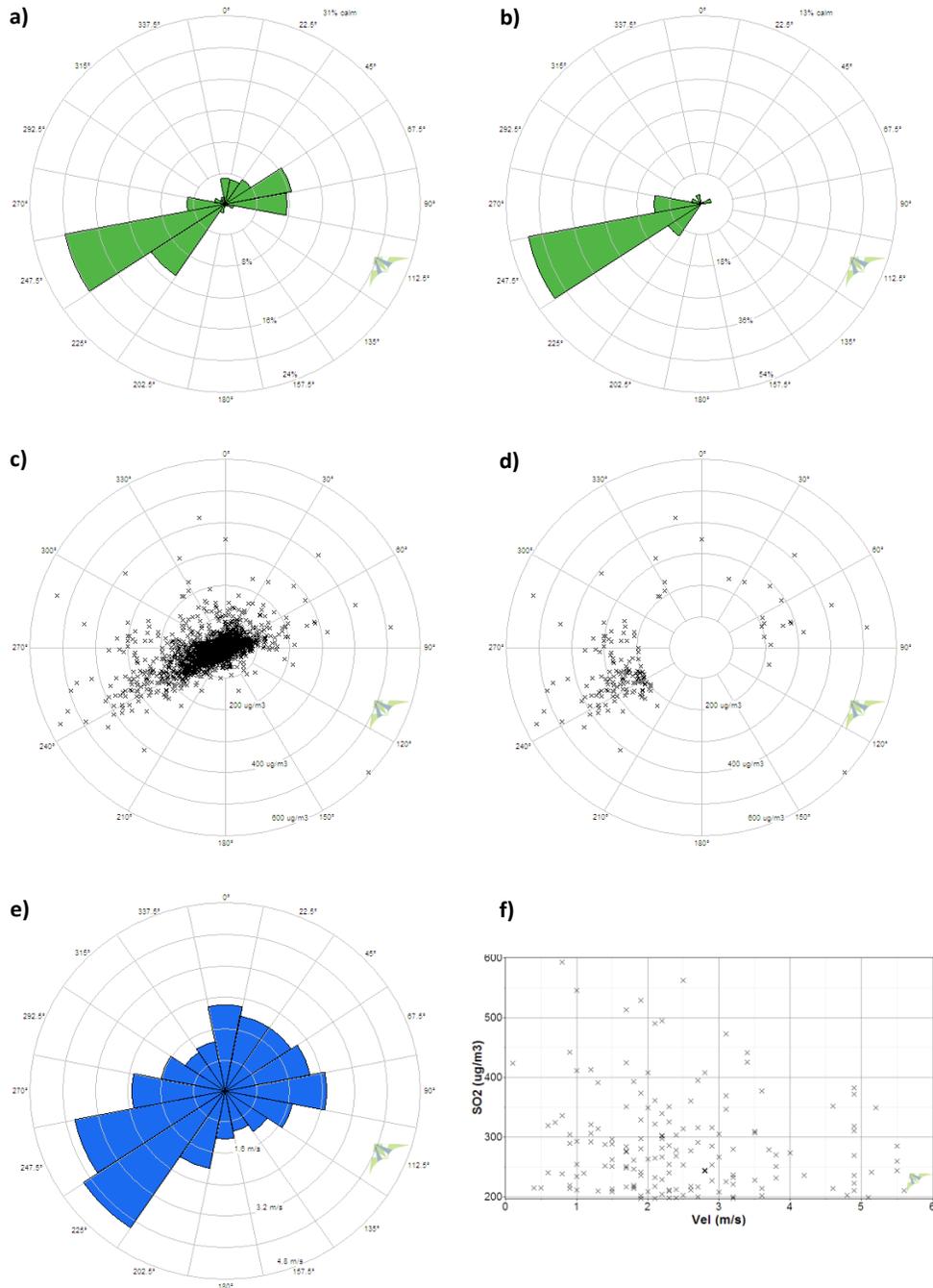


Figura 114. Análisis meteorológico, zona Huasco, estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo, 2011-2013

En la estación Km. 40 la dirección predominante es noroeste, y en segunda medida sureste, como se observa en (a), al momento de presentarse los peaks de  $\text{SO}_2$  en la estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo, la dirección predominante en Km. 40 es noroeste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de  $\text{SO}_2$  tienen una marcada componente noroeste lo que se refleja en las mayores concentraciones de  $\text{SO}_2$  en (d). En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección suroeste-noroeste, en (e), mientras que los peaks de  $\text{SO}_2$  se presentan mayormente con velocidades entre los 3 y 5 m/s.

**vi) b.- HUASCO. ESTACIÓN INTERIOR CENTRAL TERMOELÉCTRICA HUACOLDA (meteorología) y ESCUELA JOSE MIGUEL CARRERA (concentraciones)**



**Figura 115. Análisis meteorológico, zona Huasco, estación Escuela JMC, 2011-2013**

En la estación Interior Central Termoeléctrica la dirección predominante es suroeste como se observa en (a), misma situación al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub>, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente suroeste, sin embargo, destaca que no se presentan concentraciones con dirección del viento sur o sureste. Las mayores concentraciones, en (d), se observan con dirección suroeste, norte y noreste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con dirección suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 1 y 3 m/s, y en menor medida entre los 3 y 6 m/s.

**Tabla 15. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Km 40 y Segunda Compañía de Bomberos**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	3,4	224,1	0,0	3,6
11.25° - 33.75°	3,7	36,4	0,1	4,7
33.75° - 56.25°	4,2	115,2	0,2	2,3
56.25° - 78.75°	2,9	48,2	0,2	2,3
78.75° - 101.25°	3,4	129,3	0,4	7,3
101.25° - 123.75°	3,9	135,3	1,5	7,0
123.75° - 146.25°	3,7	76,7	2,3	8,6
146.25° - 168.75°	5,2	161,8	0,1	5,5
168.75° - 191.25°	4,7	85,3	0,2	4,7
191.25° - 213.75°	4,5	42,4	0,5	4,3
213.75° - 236.25°	4,5	88,0	2,6	8,3
236.25° - 258.75°	6,3	182,7	3,4	9,0
258.75° - 281.25°	5,5	150,5	2,1	9,2
281.25° - 303.75°	9,7	763,3	3,0	7,2
303.75° - 326.25°	14,8	515,7	2,9	5,8
326.25° - 348.75°	8,4	185,9	1,9	4,9

En la estación Segunda Compañía de Bomberos las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> provienen de dirección noroeste, viento observado en la estación cercana Km. 40.

En la estación Escuela José Miguel Carrera (JMC), las mayores concentraciones se presentan con viento proveniente del suroeste, observado en la estación Interior Central Termoeléctrica.

**Tabla 16. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Interior Termoeléctrica y Escuela José Miguel Carrera**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	7,1	423,8	2,0	8,7
11.25° - 33.75°	7,9	251,0	1,7	8,4
33.75° - 56.25°	8,6	411,0	1,5	7,9
56.25° - 78.75°	11,5	424,1	1,9	7,5
78.75° - 101.25°	13,1	513,3	2,5	8,4
101.25° - 123.75°	13,1	214,9	1,4	7,1
123.75° - 146.25°	11,0	592,9	0,9	5,1
146.25° - 168.75°	14,4	145,5	0,8	4,7
168.75° - 191.25°	17,3	98,4	1,0	4,9
191.25° - 213.75°	13,4	158,1	1,6	11,5
213.75° - 236.25°	7,6	441,3	4,1	14,8
236.25° - 258.75°	7,3	562,5	3,7	10,8
258.75° - 281.25°	14,9	441,6	2,2	5,6
281.25° - 303.75°	12,3	545,5	1,4	5,0
303.75° - 326.25°	11,3	391,3	1,1	5,0
326.25° - 348.75°	9,7	320,9	1,2	4,9

vii) CATEMU - LLAY LLAY. ESTACIÓN METEOROLÓGICA (meteorología) y SANTA MARGARITA (concentraciones)

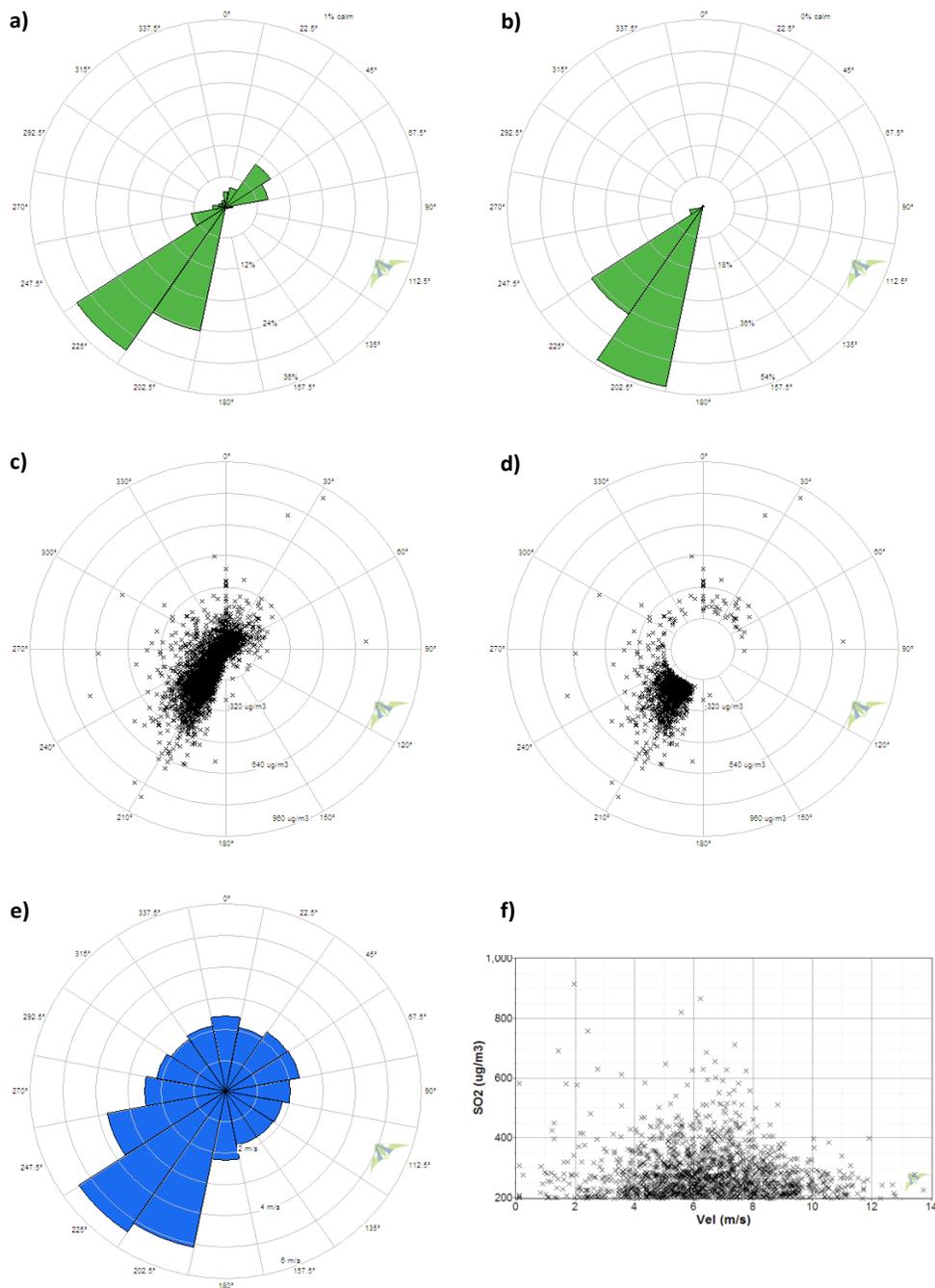


Figura 116. Análisis meteorológico, zona Catemu-Llay Llay, estación Santa Margarita, 2011-2013

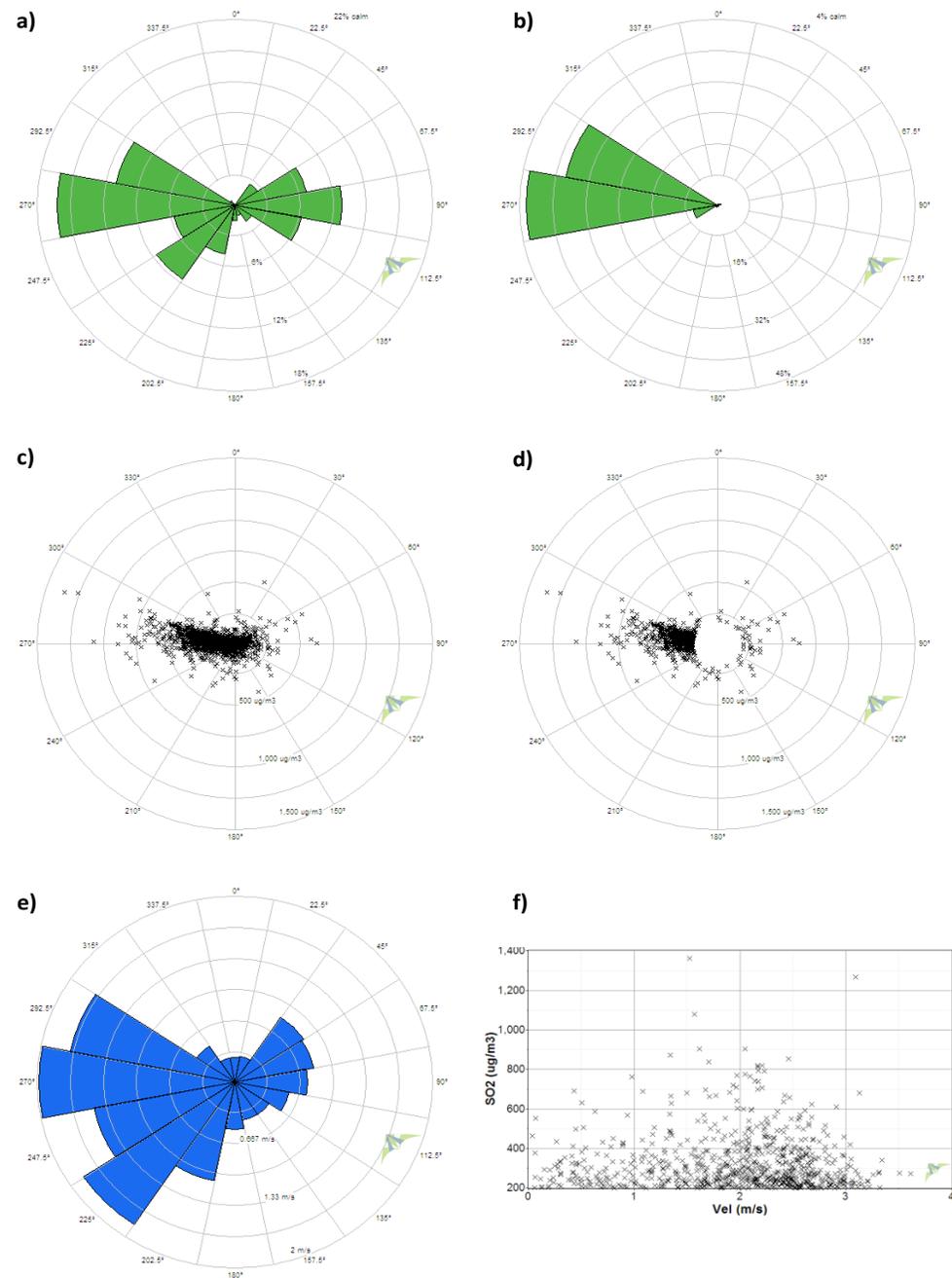
En la estación Meteorológica, la dirección del viento predominante es suroeste, y en segunda medida noreste, como se observa en (a), al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> en la estación Santa Margarita, la dirección predominante es suroeste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente suroeste, sin embargo, las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub>, que se muestran en (d), se aprecian de dirección suroeste y también algunos peaks aislados de dirección noreste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores intensidades se presentan desde el suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 4 y 8 m/s, de acuerdo a la nube de puntos, no obstante también se aprecian peaks con velocidades menores, entre los 1 y 3 m/s, en (f).

**Tabla 17. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Meteorológica y Santa Margarita**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	15,8	480,2	1,7	12,4
11.25° - 33.75°	14,8	915,1	1,8	8,5
33.75° - 56.25°	9,9	318,9	2,1	10,6
56.25° - 78.75°	10,2	225,4	2,2	8,0
78.75° - 101.25°	12,3	691,1	1,8	6,1
101.25° - 123.75°	12,4	176,3	1,5	8,1
123.75° - 146.25°	14,6	150,8	1,4	6,2
146.25° - 168.75°	14,0	159,4	1,6	6,1
168.75° - 191.25°	18,2	579,4	1,7	10,6
191.25° - 213.75°	79,3	865,3	4,9	14,0
213.75° - 236.25°	33,1	584,1	5,5	13,7
236.25° - 258.75°	24,9	712,2	3,3	10,9
258.75° - 281.25°	21,8	629,9	1,9	10,6
281.25° - 303.75°	21,3	581,7	1,5	9,0
303.75° - 326.25°	20,1	379,5	1,6	9,4
326.25° - 348.75°	17,4	282,9	1,6	9,4

En la tabla resumen se puede apreciar que las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> en la estación Santa Margarita, van asociadas a direcciones del viento desde el suroeste y también desde el noreste (el peak mayor es de esta dirección). Si se observan las medianas de concentraciones, las mayores se presentan desde el suroeste.

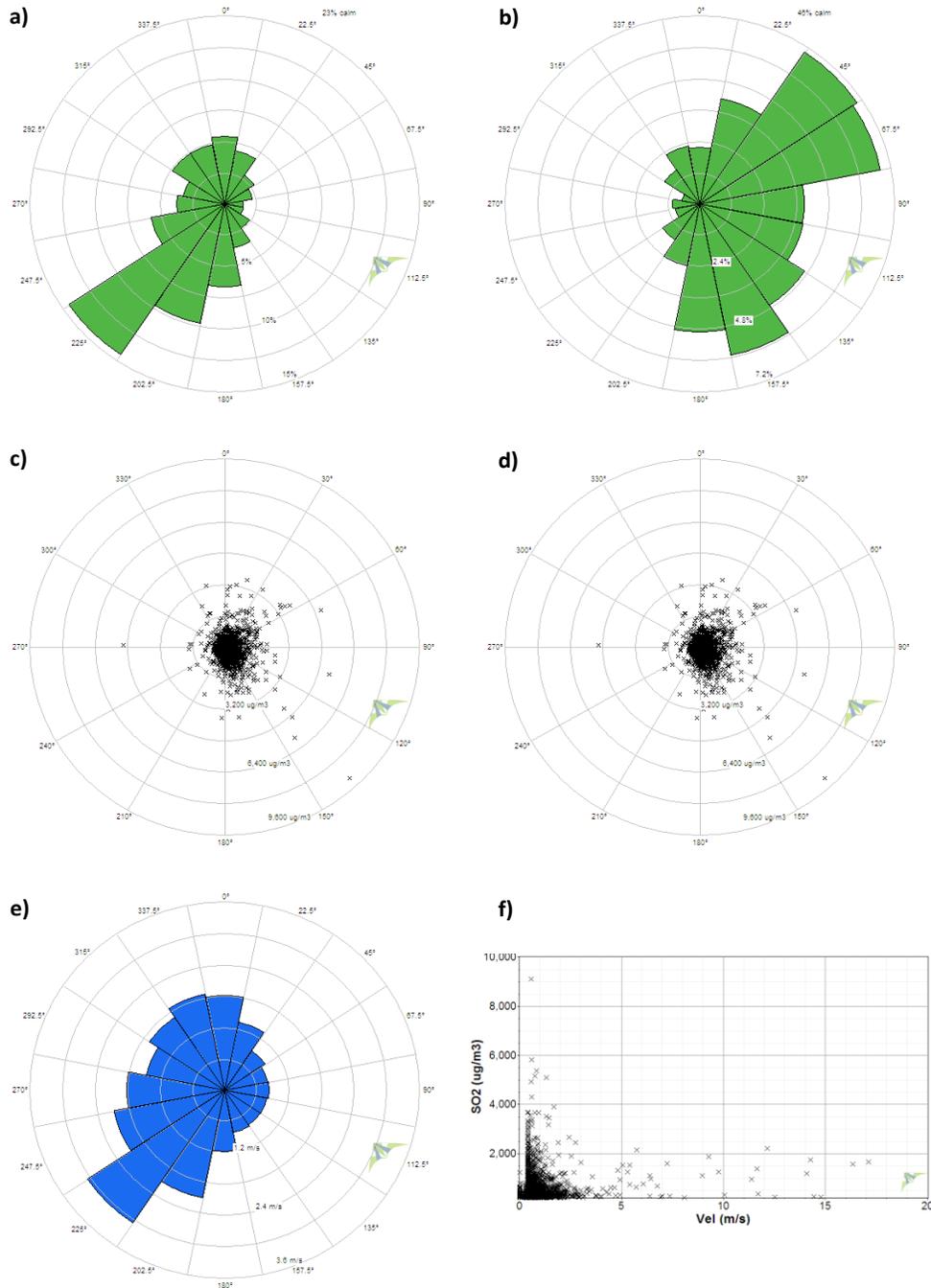
**viii) a.- QUINTERO - PUCHUNCAVÍ. ESTACIÓN LOS MAITENES (meteorología y concentraciones)**



**Figura 117. Análisis meteorológico, zona Quintero-Puchuncaví, estación Los Maitenes, 2011-2013**

En la estación Los Maitenes se aprecia un comportamiento del viento con una rotación entre oeste y este, como se observa en (a), al momento de los peaks de  $\text{SO}_2$  la dirección del viento es predominante desde el oeste, en (b). Al observar la nube de puntos de concentraciones, en (c), se puede apreciar que hay una tendencia hacia el oeste, lo que se ratifica en (d), con las mayores concentraciones de dirección oeste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con oeste, en (e), mientras que los peaks de  $\text{SO}_2$  se presentan mayormente con velocidades entre los 1 y 3 m/s mayoritariamente.

**viii) b.- QUINTERO – PUCHUNCAVÍ. ESTACIÓN GNL QUINTERO (meteorología y concentraciones)**



**Figura 118. Análisis meteorológico, zona Quintero-Puchuncaví, estación GNL Quintero, 2011-2013**

En la estación GNL Quintero la dirección predominante del viento es suroeste, y en segunda medida norte, como se observa en (a). Al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> la dirección del viento predominante es noreste y en segunda medida sureste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen mayormente una componente desde el este, y las mayores concentraciones, en (d), se observan desde el sureste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan con suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 0,5 y 2 m/s, como se ve en (f).

**Tabla 18. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Los Maitenes**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	12,8	274,3	0,3	0,7
11.25° - 33.75°	12,4	550,6	0,3	1,5
33.75° - 56.25°	9,1	326,3	0,6	3,4
56.25° - 78.75°	9,1	565,4	0,8	3,2
78.75° - 101.25°	9,9	629,7	0,7	3,0
101.25° - 123.75°	9,0	334,2	0,5	2,9
123.75° - 146.25°	9,2	375,8	0,3	2,9
146.25° - 168.75°	8,1	434,0	0,3	5,1
168.75° - 191.25°	8,5	291,4	0,4	4,7
191.25° - 213.75°	8,0	379,8	0,9	5,3
213.75° - 236.25°	7,8	430,3	1,8	5,9
236.25° - 258.75°	12,6	772,9	1,5	4,7
258.75° - 281.25°	37,0	1078,5	2,1	4,3
281.25° - 303.75°	26,7	1362,0	1,7	9,4
303.75° - 326.25°	12,7	323,0	0,4	9,2
326.25° - 348.75°	12,4	461,6	0,3	1,2

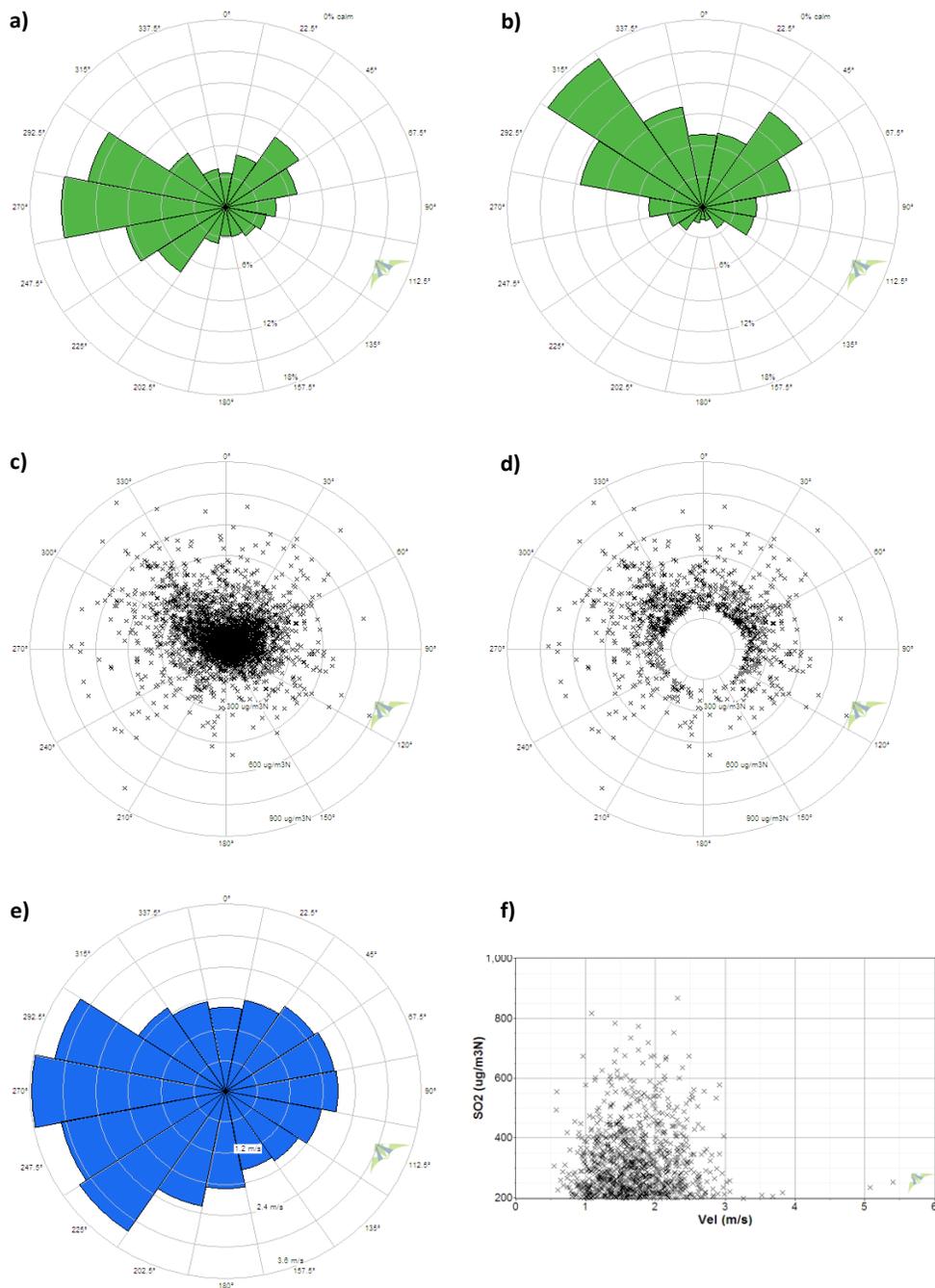
En Los Maitenes las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan con direcciones predominantes desde el oeste-suroeste y en segunda medida desde el noreste.

En GNL Quintero, en la siguiente tabla, se aprecia que las máximas concentraciones se producen con vientos de dirección sureste y este.

**Tabla 19. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación GNL Quintero**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	16,2	3283,0	1,5	17,1
11.25° - 33.75°	25,4	3665,4	1,1	12,4
33.75° - 56.25°	48,2	3655,5	0,7	15,1
56.25° - 78.75°	62,3	5162,1	0,6	12,5
78.75° - 101.25°	45,6	2519,2	0,5	18,3
101.25° - 123.75°	40,6	5359,3	0,5	17,1
123.75° - 146.25°	34,6	9108,7	0,6	14,1
146.25° - 168.75°	22,3	3387,7	0,7	14,4
168.75° - 191.25°	15,4	3669,3	1,0	14,3
191.25° - 213.75°	11,2	2635,7	1,8	14,0
213.75° - 236.25°	10,2	1578,1	2,7	16,5
236.25° - 258.75°	11,5	2111,1	1,9	15,1
258.75° - 281.25°	13,4	5081,0	1,6	8,8
281.25° - 303.75°	13,4	1506,2	1,3	13,9
303.75° - 326.25°	13,4	1539,1	1,6	14,8
326.25° - 348.75°	12,9	3341,6	1,6	17,4

**ix) MACHALÍ-COYA. ESTACIÓN COYA CLUB (meteorología y concentraciones)**



**Figura 119. Análisis meteorológico, zona Machalí-Coya, estación Coya Club, 2011-2013**

En la estación Coya Club la dirección predominante del viento es oeste y en segunda medida noreste, como se observa en (a). La dirección predominante al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> es noroeste y en segunda medida noreste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan desde casi todas las direcciones, no obstante, en (d) se aprecia que las mayores concentraciones predominan desde direcciones con componente norte. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan de dirección oeste y suroeste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 1 y 3 m/s, lo que se puede apreciar en (f).

**Tabla 20. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estación Coya Club**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	3,7	694,3	1,6	3,4
11.25° - 33.75°	3,0	624,2	1,7	5,8
33.75° - 56.25°	5,1	782,5	1,7	9,7
56.25° - 78.75°	4,9	653,4	1,7	11,2
78.75° - 101.25°	8,0	498,8	1,5	12,5
101.25° - 123.75°	2,9	734,7	1,5	12,1
123.75° - 146.25°	1,7	422,7	1,4	10,2
146.25° - 168.75°	1,6	467,9	1,4	6,6
168.75° - 191.25°	1,6	512,9	1,6	5,9
191.25° - 213.75°	1,6	388,1	1,9	7,2
213.75° - 236.25°	1,6	815,9	3,1	8,1
236.25° - 258.75°	1,6	673,5	2,9	7,1
258.75° - 281.25°	1,6	717,5	3,6	8,9
281.25° - 303.75°	1,6	693,2	2,9	8,8
303.75° - 326.25°	2,6	867,6	1,8	7,2
326.25° - 348.75°	3,8	751,4	1,7	6,4

En la tabla resumen se puede apreciar que los máximos de SO<sub>2</sub> provienen de distintas direcciones del viento, tal como se vio anteriormente, no existe una dirección predominante para las altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, solo existe una predominancia al norte.

x) **CORONEL-LOTA-HUALPÉN-TALCAHUANO. ESTACIÓN HUALPÉN**  
**(meteorología) y JUNJI (concentraciones)**

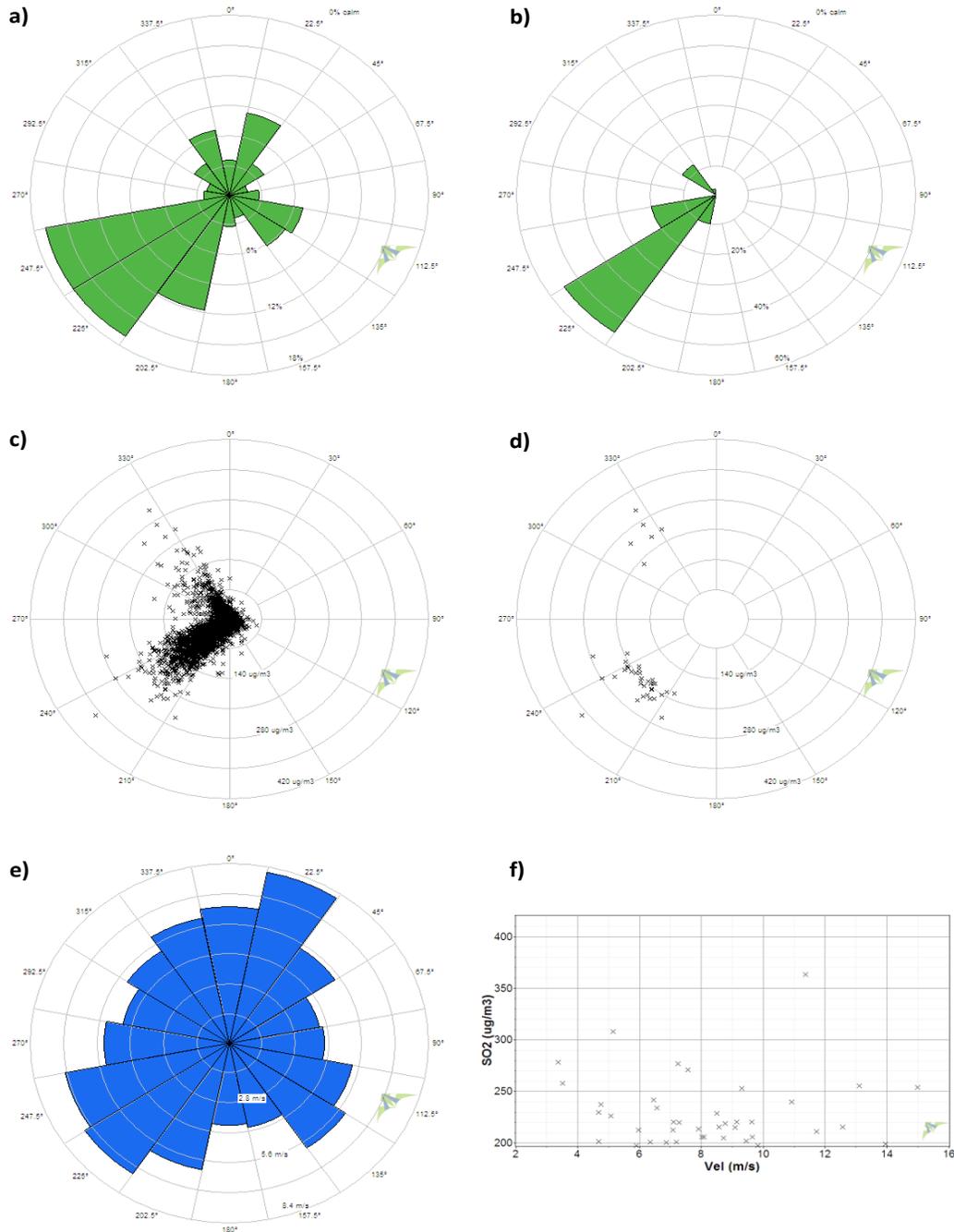


Figura 120. Análisis meteorológico, zona Coronel-Lota-Hualpén-Talcahuano estación Junji, 2011-2013

En la estación Hualpén, la dirección predominante del viento es suroeste, y en segunda medida norte y sureste, como se observa en (a). Al momento de presentarse los peaks de SO<sub>2</sub> en Junji, la dirección predominante es suroeste y en segunda medida noroeste, en (b). Se observa en (c) que las concentraciones de SO<sub>2</sub> tienen dos componentes predominantes, suroeste y noroeste. En (d), las mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> se aprecian de dirección suroeste y noroeste. En cuanto a las velocidades del viento, las mayores se presentan de dirección noroeste, suroeste y sureste, en (e), mientras que los peaks de SO<sub>2</sub> se presentan mayormente con velocidades entre los 4 y 8 m/s, no obstante, también se aprecian peaks de concentraciones con velocidades superiores a los 10 m/s.

**Tabla 21. Resumen de concentraciones y velocidades por dirección del viento, estaciones Hualpén y Junji**

Dirección (grados sexagesimales)	SO <sub>2</sub>		Velocidad del viento	
	Mediana (µg/m <sup>3</sup> N)	Máximo (µg/m <sup>3</sup> N)	Mediana (m/s)	Máximo (m/s)
348.75° - 11.25°	4,4	97,9	6,0	20,9
11.25° - 33.75°	2,8	48,6	7,7	26,1
33.75° - 56.25°	3,3	37,5	5,0	18,5
56.25° - 78.75°	3,7	33,0	3,5	15,1
78.75° - 101.25°	3,4	51,2	3,7	14,6
101.25° - 123.75°	3,5	60,1	5,0	16,3
123.75° - 146.25°	3,4	58,2	5,5	18,2
146.25° - 168.75°	4,3	85,1	3,4	13,1
168.75° - 191.25°	5,5	134,1	3,5	14,1
191.25° - 213.75°	8,1	257,8	5,6	18,4
213.75° - 236.25°	21,4	363,0	7,1	20,5
236.25° - 258.75°	16,4	277,9	6,8	17,8
258.75° - 281.25°	6,2	122,9	5,1	13,5
281.25° - 303.75°	6,6	167,8	4,1	13,7
303.75° - 326.25°	11,8	307,8	4,7	15,1
326.25° - 348.75°	9,7	241,5	5,7	16,6

En la tabla resumen se puede apreciar que las altas concentraciones de SO<sub>2</sub> se presentan entre el suroeste y noroeste.

## 2.4. Conclusiones

El despliegue gráfico de cada una de las estaciones de calidad del aire entrega información del estado actual e histórico de las estaciones, completitud de los datos, y valores altos extremos. Sin embargo entrega un análisis grueso debido a la alta cantidad de datos incorporados en los gráficos.

En cada zona fue posible identificar comportamientos particulares, tales como ciclo interanuales en las concentraciones, periodos con aumentos o disminuciones en las concentraciones y tendencias en el tiempo.

**Tabla 22 Tendencia de las estaciones por zona en las concentraciones, según análisis de regresión lineal.**

Zona	Estación	Tendencia (Pendiente)
Tocopilla	Escuela E-10	Aumentando (+0.0675)
	Gobernación	Sin Tendencia (-0.0007)
Calama	Servicio Médico Legal	Aumentando (+0.0013)
	Hospital El Cobre	Sin Tendencia (+0.0009)
Mejillones	Ferrocarriles	Aumentando (+0.0012)
	JJ La Torre	Aumentando (+0.0036)
	Subestación Eléctrica	Aumentando (+0.0046)
Antofagasta – La Negra	Norte	Aumentando (+0.0023)
	Sur	Disminuyendo (-0.0603)
	Coviefi	Sin Tendencia (-0.0009)
Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla	Copiapó	Aumentando (+0.0055)
	Los Volcanes	Aumentando (+0.0114)
	San Fernando	Aumentando (+0.0052)
	Paipote	Aumentando (+0.0116)
	Tierra Amarilla	Aumentando (+0.0106)
	Pabellón	Aumentando (+0.0068)
Huasco	SM1	Aumentando (+0.0027)
	SM2	Sin Tendencia (-0.0005)
	SM3	Disminuyendo (-0.0015)
	SM4	Sin Tendencia (+0.0009)
	SM5	Aumentando (+0.0027)
	SM6	Aumentando (+0.0028)

	SM7	Disminuyendo (-0.0049)
	SM8	Aumentando (+0.0026)
	SM9	Aumentando (+0.0052)
	SM10	Aumentando (+0.0040)
<b>Catemu</b>	Lo Campo	Aumentando (+0.0042)
	Estación Meteorológica – Santa Margarita	Aumentando (+0.0015)
	Catemu	Disminuyendo (-0.0029)
	Romeral	Disminuyendo (-0.0016)
<b>Quintero – Puchuncaví</b>	La Greda	Sin Tendencia (-0.0002)
	Los Maitenes	Disminuyendo (-0.0016)
	Puchuncaví	Sin Tendencia (+0.0009)
	Sur	Disminuyendo (-0.0011)
	Valle Alegre	Disminuyendo (-0.0008)
	Ventanas	Aumentando (+0.003)
	Quintero	Aumentando (+0.0104)
	GNL Quintero	Disminuyendo (-0.003)
<b>Machalí – Coya</b>	Coya Club	Disminuyendo (-0.0081)
	Coya Población	Disminuyendo (-0.0017)
	Cauquenes	Disminuyendo (-0.0014)
	Cipreses	Disminuyendo (-0.0017)
<b>Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano</b>	CAP	Disminuyendo (-0.0055)
	Inpesca	Disminuyendo (-0.0037)
	Indura	Disminuyendo (-0.0091)
	Junji	Disminuyendo (-0.0086)
	Price	Disminuyendo (-0.0015)
	Lagunillas	Sin Tendencia (+0.0007)
	Coronel Norte	Disminuyendo (-0.0032)
	Cerro Merquín	Disminuyendo (-0.0015)
	Coronel Sur	Disminuyendo (-0.0021)
	Lota Urbana	Sin Tendencia (-0.0004)
	Lota Rural	Aumentando (+0.0017)

En la Tabla 22 se logra distinguir las estaciones que presentan un aumento o una disminución en las concentraciones de SO<sub>2</sub>, basado en el análisis de regresión lineal de los datos con resolución temporal más fina de cada estación (10 minutos o 1 hora). Es necesario acotar que hay estaciones que presentan un grado de tendencia, pero que al momento de evaluar el valor numérico de la pendiente, además de un chequeo visual de las concentraciones en gráficos de 10 minutos (o de 1 hora), resulta mínimo o poco representativa su tendencia. Los gráficos que principalmente no tienen una tendencia clara al aumento o disminución de concentraciones de SO<sub>2</sub>, son los que tienen pendientes lineales a la decena de la milésima parte (por ejemplo, estación Lota Urbana con pendiente -0.0004). En general, es posible distinguir algún grado de tendencia en las concentraciones de las estaciones que presentan una pendiente lineal a la milésima parte (por ejemplo, estación Lota Rural con pendiente +0.0017).

Dentro de las pendientes lineales que caben destacar por su valor numérico alto, es la estación Escuela E-10, perteneciente a la zona de Tocopilla, lo cual refleja un aumento notorio en las concentraciones de SO<sub>2</sub> durante el periodo considerado.

Con la estadística descriptiva se obtiene información clara y explícita de la situación de cada zona incorporada en el estudio a modo de obtener antecedentes que apoyen la correcta toma de decisiones en torno a la revisión de la norma primaria de calidad del aire para SO<sub>2</sub>.

Por su parte, el promedio del percentil 99 de los tres últimos años es un buen indicador del estado de la calidad del aire asociado al dióxido de azufre. Desde esta perspectiva, se ordenan las zonas en forma descendente (Ver Tabla 23).

**Tabla 23 Promedio percentil 99 de SO<sub>2</sub>, últimos tres años. Orden descendente.**

Zona	Estación	Percentil 99 (2011-2013) µg/m <sup>3</sup> N
<b>Antofagasta – La Negra</b>	Sur*	1157
<b>Quintero - Puchuncaví</b>	GNL Quintero	1059
<b>Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla</b>	Paipote	607
<b>Tocopilla</b>	Escuela E-10	457
<b>Catemu – Llay Llay</b>	Santa Margarita*	398
<b>Machalí Coya</b>	Coya Club	378
<b>Huasco</b>	Escuela JM Carrera*	168
<b>Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano</b>	Junji	136

<b>Mejillones</b>	Subestación Eléctrica*	90
<b>Calama</b>	SML	54

(\*) Estación de monitoreo No clasificada como EMRPG (Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional Para Gases – SO<sub>2</sub>).

Los resultados mostrados en la Tabla 23 no representan la evaluación de la normativa vigente para SO<sub>2</sub>, ya que como se mencionó anteriormente, la metodología de trabajo es diferente. Lo que la tabla está entregando, es un panorama de las concentraciones de SO<sub>2</sub> en el país, representado por las peores estaciones en 10 zonas priorizadas, siendo La Negra, Quintero y Paipote las 3 zonas con las mayores concentraciones, según este análisis.

Del análisis meteorológico se concluye que el viento es un factor importante en el transporte de SO<sub>2</sub>. En todas las zonas se encuentra una relación entre la velocidad y la dirección, las mayores concentraciones se favorecen a una cierta dirección y a un cierto umbral de viento. Al tomar en consideración la dirección y velocidad del viento predominante en situaciones de altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, se obtiene la Tabla 24 que resume estos escenarios.

**Tabla 24 Tabla resumen de umbrales del viento que favorecen altas concentraciones de SO<sub>2</sub>.**

Zona	Estación	Dirección Predominante	Umbral del Viento (m/s)	Denominación Viento
<b>Tocopilla</b>	Escuela E-10	Oeste (O)	0.5 – 4	Débil, ocasional Ligerito
<b>Calama</b>	Servicio Médico Legal	Noreste (NE)	1.5 – 3	Débil
<b>Mejillones</b>	Subestación Eléctrica	Noroeste (NO)	0.8 – 2.5	Débil
<b>Antofagasta</b>	Sur	Norte (N) o Noreste (NE)	1 – 2	Débil
	Coviefi	Suroeste (SO)	< 3	Débil, ocasional Calma
<b>Copiapó</b>	Paipote	Este (E)	0.6 – 1.6	Débil
	Tierra Amarilla	Noreste (NE)	0.8 – 1.8	Débil
<b>Huasco</b>	SM3	Noroeste (NO)	3 – 5	Ligerito
	SM9	Suroeste (SO)	1 – 3	Débil
<b>Catemu</b>	Estación Meteorológica – Santa Margarita	Suroeste (SO)	1 – 3	Débil
			4 – 8	Ligerito a Moderado

<b>Quintero – Puchuncaví</b>	Los Maitenes	Oeste (O)	1 – 3	Débil
	GNL Quinteros	Sureste (SE)	0.5 – 2	Débil
<b>Machalí – Coya</b>	Coya Club	Norte (N)	1 – 3	Débil
<b>Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano</b>	Junji	Suroeste (SO)	4 – 8	Ligero a Moderado

Se puede observar, que la velocidad predominante a la hora del aumento en las concentraciones de SO<sub>2</sub> se presenta en el rango Débil, mas no calma, esto quiere decir que es necesaria cierta velocidad umbral para que el gas se desplace desde la fuente de emisión hasta la estación de monitoreo y que con vientos demasiado débiles, estas emisiones quedan en en las cercanías de la fuente. Por otra parte, la ocurrencia de vientos de mayor intensidad, está asociada a mejores condiciones de ventilación (vientos ascendentes de mayor intensidad), por lo que los contaminantes se dispersan de mejor manera.

En cuanto a la dirección del viento, los resultados son exclusivos de cada zona y estación monitorea, ya que dependen de la orografía local, no obstante, fue posible identificar un octante predominante en cada estación.

Estos resultados no indican una condición necesaria para la ocurrencia de altas concentraciones de SO<sub>2</sub>. Esto quiere decir que aun cumpliéndose el rango de velocidad y dirección en el viento, no necesariamente aumentarán las concentraciones y por otro lado, podrían existir alzas en las concentraciones con otros rangos de viento.

## 3. EFECTOS DEL SO<sub>2</sub> EN LA SALUD DE LAS PERSONAS

### 3.1. Epidemiología

#### 3.1.1. Resumen

La exposición a dióxido de azufre en el aire produce una variedad de efectos agudos y crónicos sobre la salud de la población. Particularmente sobre las personas portadoras de asma. La evidencia toxicológica demuestra los mecanismos de daño, tanto respiratorio como sistémico. También la evidencia epidemiológica indica daño respiratorio y cardiovascular agudo, así como daño crónico respiratorio y sobre el desarrollo fetal.

El Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) que proviene principalmente de la combustión de combustibles fósiles (madera, carbón y derivados del petróleo) ha estado históricamente involucrado en los principales episodios de alta contaminación atmosférica (Valle del Mosa, Bélgica 1930; Donora, Estados Unidos 1948; Poza Rica, México 1950, y Londres 1952). Estos episodios y sus consecuencias en la salud pública de las poblaciones afectadas fueron el fundamento para el establecimiento de las regulaciones sobre la calidad del aire en todo el mundo.

En el año 2005 la Organización Mundial de la Salud realiza una revisión de la guía de calidad del aire, tomando en consideración antecedentes provenientes de estudios epidemiológicos, toxicológicos, evaluación de la exposición, gestión de la calidad del aire y políticas públicas. Esta nueva guía, centra su revisión en varios aspectos de la gestión de la calidad del aire y establece nuevos niveles para los contaminantes criterios<sup>14</sup>.

Para el SO<sub>2</sub> propone como nivel guía 20 µg/m<sup>3</sup> para promedio diario y 500 µg/m<sup>3</sup> para promedio de 10 minutos de exposición. Este último valor proviene de estudios toxicológicos experimentales realizados en asmáticos voluntarios expuestos a cámaras con presencia del contaminante y ejercicio físico. Este tipo de estudio tiene ventajas provenientes de una muy cuidadosa evaluación de la exposición, medir el efecto aislado del contaminante y en forma muy precisa los efectos de la exposición sobre la función pulmonar. Sin embargo también posee las siguientes limitaciones: escaso número de sujetos evaluados, incertidumbre en la selección de los participantes (sesgo de selección), y restricciones sobre la actividad física y la duración de la exposición.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA publicó en el año 2010, un análisis del impacto de la nueva regulación del SO<sub>2</sub>.<sup>15</sup> El análisis de los beneficios de la regulación del contaminante, reconoció la relación causal existente entre la exposición a corto plazo del SO<sub>2</sub> con la aparición de efectos en el sistema respiratorio,

<sup>14</sup> WHO Aire Quality Guidelines. Global Update 2005

<sup>15</sup> EPA Final Regulatory Impact Analysis (RIA) for the SO<sub>2</sub> National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)

específicamente bronco-constricción. Identificó a los asmáticos como las personas más sensibles a este tipo de contaminación. Y, seleccionó como los objetivos de la regulación los síntomas respiratorios agudos, las crisis de asma, las consultas a urgencias por asma y las hospitalizaciones por causa respiratoria. Con estos efectos cuantificó los beneficios de la regulación. Además contempló los co-beneficios de la reducción en MP2,5, que la regulación del SO<sub>2</sub> consigue. La tabla siguiente resume los efectos sobre la salud contemplados en el análisis de beneficio de la regulación del SO<sub>2</sub> por la EPA.

**Tabla 25. Efectos sobre la salud considerados en la evaluación del beneficio de la regulación del SO<sub>2</sub>**

Contaminante	Efecto
SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hospitalizaciones por causa respiratoria</li> <li>• Consultas de urgencia por asma</li> <li>• Exacerbaciones o crisis de asma</li> <li>• Síntomas respiratorios agudos</li> </ul>
MP2,5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mortalidad prematura en adultos</li> <li>• Bronquitis aguda y crónica</li> <li>• Hospitalizaciones por causa respiratoria y cardiovascular</li> <li>• Consultas de urgencia por asma</li> <li>• Infarto Agudo al Miocardio no fatal</li> <li>• Enfermedad respiratoria alta y baja</li> <li>• Restricción de actividad diaria menor</li> <li>• Días de trabajo perdidos</li> <li>• Exacerbación del asma</li> <li>• Mortalidad Infantil.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

El Ministerio de Medio Ambiente ha solicitado la identificación de información científica, internacional y chilena, respecto de los efectos del SO<sub>2</sub> en la salud de las personas de modo de contar con antecedentes para la revisión de la norma primaria de calidad del aire de SO<sub>2</sub>.

### 3.1.2. Metodología

Para dar respuesta al requerimiento de describir los efectos del SO<sub>2</sub> sobre la población se realizó una búsqueda de información epidemiológica denominada revisión sistemática de la literatura y el cálculo de la estimación de la carga de enfermedad debido al SO<sub>2</sub> en la población chilena. También se realizó un resumen de la información toxicológica existente respecto del contaminante.

A continuación se detalla el método seguido para la sistematización de la información epidemiológica.

a) Revisión sistemática de la literatura:

Esta se llevó a cabo mediante una búsqueda en PubMed, entre los años 2004 y 2014, utilizando las siguientes palabras claves: *Health effects- Sulphur Dioxide – air pollution*.

PubMed es un motor de búsqueda de libre acceso a la base de datos MEDLINE de citas y resúmenes de artículos de investigación biomédica. Ofrecido por la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos como parte de *Entrez*. MEDLINE tiene alrededor de 4800 revistas publicadas en Estados Unidos y en más de 70 países de todo el mundo desde 1966 hasta la actualidad. Es la base de datos de bibliografía médica más amplia que existe. Elaborada por la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos.

Es una versión automatizada de tres índices impresos: Index Medicus, Index to Dental Literature e International Nursing Index, recoge referencias bibliográficas de los artículos publicados en unas 4800 revistas médicas desde 1966. Actualmente reúne más de 15000000 de citas.

Cada registro de MEDLINE es la referencia bibliográfica de un artículo científico publicado en una revista médica, con los datos bibliográficos básicos de un artículo (Título, autores, nombre de la revista, año de publicación) que permiten la recuperación de estas referencias. PubMed incluye 24 millones de citas de literatura biomédica proveniente de MEDLINE, revistas científicas y libros.

El primer filtro utilizado para la revisión bibliográfica fue *Review*, lo que resultó en una selección de 31 artículos, de los cuales sólo 11, es decir el 35% de ellos comunicaban resultados sobre el SO<sub>2</sub> (Tabla 26).

Para obtener mayor información sobre la literatura publicada, casos con asociación y sin asociación, se levantó el filtro *Review*, y se agregó el filtro de estudios en humano además de las otras características de la búsqueda. Con esto se amplió la selección a 368 artículos, de los cuales 141 (38,3%) analizaban efectos de la exposición ambiental al SO<sub>2</sub>, el resto se referían a otros contaminantes atmosféricos, principalmente al material particulado que cuenta con una nutrida literatura médica.

Varios de los artículos además se referían a estudios sobre monitoreo, índices y modelación atmosférica, temas que estaban fuera de los criterios de inclusión de la revisión pues lo que interesaba era recoger publicaciones que describieran efectos del SO<sub>2</sub> sobre la salud de las personas.

Una vez identificadas las publicaciones que cumplieron con los criterios de inclusión se procedió a analizar la información y a sistematizarla. Con ellos se logró resumir los antecedentes internacionales respecto de funciones dosis respuesta de los efectos sobre la salud humana de distintas modalidades de exposición al SO<sub>2</sub>, vía atmosférica.

Finalmente para identificar las funciones dosis-respuesta más robustas se procedió a incluir un nuevo filtro a la revisión sistemática denominado Meta-análisis, que permitió seleccionar las publicaciones que cumplieran criterios estrictos de inclusión, de un punto de vista metodológico, y que permiten a los autores estimar funciones de riesgo generalizables a toda población humana.

La búsqueda de estudios realizados en Chile se ejecutó con el explorador google, y la revisión sistemática de Pubmed antes comentada.

b) Estimación de la carga de enfermedad:

La estimación de la carga de enfermedad debida a un factor de riesgo, en este caso la exposición a un contaminante atmosférico como es el dióxido de azufre se realizó siguiendo la metodología propuesta por la Organización Mundial de la Salud, para el cálculo de la carga de enfermedad producida por la contaminación atmosférica de exteriores (Ostro, 2004)<sup>16</sup>.

Ella propone para el cálculo del número esperado de casos, es decir casos atribuibles al contaminante atmosférico, las siguientes fórmulas.

$$AF = (RR-1)/RR \quad (1)$$

Donde

AF = Fracción Atribuible al contaminante estudiado

RR = función de riesgo, que puede ser una razón de prevalencia (RP), el riesgo relativo (RR) o una razón de chances (OR)

$$E = AF \times B \times P \quad (2)$$

---

<sup>16</sup> Ostro B, Outdoor Air Pollution. Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. WHO, 2004.

Donde:

E = Casos Atribuibles

AF = Fracción Atribuible

B = Prevalencia, Incidencia o AVISA

P = Población

Para estimar la carga de enfermedad frente a la exposición a SO<sub>2</sub> se calcularon los siguientes indicadores:

- Años de Vida Ajustados por Discapacidad (AVISA): Para tal efecto se utilizó el último estudio de Carga de Enfermedad (Minsal, 2007) de donde se extrajeron los AVISA de todas las patologías que presentaron asociación significativa identificadas de la revisión sistemática de la información publicada en revistas científicas con comité editorial. Este indicador se estimó para todo el país, bajo el supuesto de que toda la población está expuesta.
- Casos atribuibles de asma, para lo cual se utilizó la prevalencia de dicha enfermedad aportada por la Encuesta Nacional de Salud 2009-2010 (Minsal, 2010). Este indicador se estimó para todas las comunas de las localidades seleccionadas por la contraparte del estudio y todo el país.
- Casos atribuibles de muerte, para lo cual se utilizaron los registros de mortalidad del Departamento de Estadísticas e Información del Ministerio de Salud del año 2011. Este indicador se estimó para todas las comunas de las localidades seleccionadas por la contraparte del estudio y todo el país.
- Casos atribuibles de hospitalizaciones, para lo cual se utilizaron los registros del Departamento de Estadísticas e Información del Ministerio de Salud del año 2011. Este indicador se estimó para todas las comunas de las localidades seleccionadas por la contraparte del estudio y todo el país.
- Casos atribuibles de consultas de urgencias respiratorias, para lo cual se utilizaron los registros de atenciones de Urgencia del Departamento de Estadísticas e Información del Ministerio de Salud del año 2013.

**Tabla 26. Revisiones Sistemáticas sobre los efectos de la contaminación atmosférica por SO<sub>2</sub>, publicaciones PubMed 2014-2004**

N	Autores	Revista, fecha publicación	Tipo de efecto estudiado	Mencionan SO <sub>2</sub>
1	Guarnieri M, Balmes JR	Lancet. 2014 May 3;383(9928):1581-92	Asma	No
2	<u>Shah AS</u> , et al	<u>Lancet</u> . 2013 Sep 21;382(9897):1039-48	Insuficiencia Cardíaca	Si
3	Shumake KL, Sacks JD, Lee JS, Johns DO	Aging ClinExp Res. 2013 Apr;25(1):3-8	Efectos Cardiovasculares y respiratorios en adultos mayores	No
4	Shang Y, et al	Environ Int. 2013 Apr; 54:100-11.	Mortalidad diaria	Si
5	<u>Li S</u> , <u>Williams G</u> , <u>Jalaludin B</u> , <u>Baker P</u> .	<u>J Asthma</u> . 2012 Nov;49(9):895-910	Función pulmonar en niños	Si
6	Stieb DM, Chen L, Eshoul M, Judek S	Environ Res. 2012 Aug;117:100-11	Peso de nacimiento y parto prematuro	No
7	Kelly FJ, Fuller GW, Walton HA, Fussell JC	Respirology. 2012 Jan 17(1):7 -19	Sistemas de alerta para salud pública	No
8	Tzivian L	J Asthma. 2011 Jun;48(5):470-81	Asma en niños	No
9	Vrijheid M, et al	Environ Health Perspect. 2011 May;119(5):598-606	Malformaciones congénitas	Si
10	<u>Shah PS</u> , et al	<u>Environ Int</u> . 2011 Feb;37(2):498-516.	Parto prematuro, bajo peso de nacimiento	Si
11	<u>Menichini F</u> , <u>Mudu P</u> .	<u>Pharmacoepidemiol Drug Saf</u> . 2010 Dec;19(12):1300-15	Medicación respiratoria	Si
12	Pedata P, Garzillo EM, Sannolo N.	G Ital Med Lav Ergon. 2010 Jan-Mar;32(1):23-31.	Mecanismos de acción	No
13	<u>Orazio FNespoli L</u> , <u>Ito K</u> , <u>Tassinari D</u> , <u>Giardina D</u> , <u>Funis M</u> , <u>Cecchi A</u> , <u>Trapani C</u> , <u>Forgeschi G</u> , <u>Vignini M</u> , <u>Nosetti L</u> , <u>Pigna S</u> , <u>Zanobetti A</u> .	<u>Environ Health Perspect</u> . 2009 Nov;117(11):1780-5	Consultas Emergencias Respiratorias	Si
14	<u>Forbes LJ</u> , <u>Kapetanakis V</u> , <u>Rudnicka AR</u> , <u>Cook DG</u> , <u>Bush T</u> , <u>Stedman JR</u> , <u>Whincup PH</u> , <u>Strachan DP</u> , <u>Anderson HR</u>	<u>Thorax</u> . 2009 Aug;64(8):657-63	Función respiratoria en adultos	Si
15	Millman A, Tang D, Perera FP.	Pediatrics. 2008 Sep;122(3):620-8	Efectos en niños	No
16	Yang IA, Fong M, Zimmerman PV, Holgate ST, Holloway JW	Thorax. 2008 Jun;63(6):555-63	Variaciones genéticas	No
17	<u>O'Connor AB</u> , <u>Roy C</u> .	<u>Am J Nurs</u> . 2008 Feb;108(2):62-70	Generalidades sobre efectos	No
18	Bernstein JA, et al	J Allergy ClinImmunol. 2008 Mar;121(3):585-91	Contaminación espacios cerrados	No
19	Zuskin E, et al	Arh Hig Rada Toksikol. 2007 Dec;58(4):479-86	Efecto de las erupciones volcánicas	Si
20	Wang L, Pinkerton KE.	Birth Defects Res C Embryo Today. 2007 Sep;81(3):144-54	Efectos neonatales en monos	Si
21	Franchini M, Mannucci PM.	J ThrombHaemost. 2007 Nov;5(11):2169-74	Efectos cardiovasculares, mecanismos	No
22	Kampa M, Castanas E	Environ Pollut. 2008 Jan;151(2):362-7	Mecanismos de acción	No

N	Autores	Revista, fecha publicación	Tipo de efecto estudiado	Mencionan SO <sub>2</sub>
23	Chen TM, Shofer S, Gokhale J, Kuschner WG	Am J Med Sci. 2007 Apr;333(4):230-4	Perspectivas históricas	No
24	Hopke PK, Rossner A.	ClinOccup Environ Med. 2006;5(4):747-71	Efectos del material particulado	No
25	Hansell A, Oppenheimer C	Arch Environ Health. 2004 Dec;59(12):628-39	Efecto de las erupciones volcánicas	Si
26	Wichmann J, Voyi KV	Rev Environ Health. 2005 Oct-Dec;20(4):265-301	Contaminación intradomiciliaria	No
27	D'Amato G, Liccardi G, D'Amato M, Holgate S	ClinExp Allergy. 2005 Sep;35(9):1113-24	Asma	No
28	Chen TM <sup>1</sup> , Shofer S, Gokhale J, Kuschner WG	Am J Med Sci. 2007 Apr;333(4):230-4	Generalidades	No
29	Trasande L, Thurston GD.	J Allergy ClinImmunol. 2005 Apr;115(4):689-99	Bases biológicas del asma	Si
30	<u>Aunan K, Pan XC.</u>	<u>Sci Total Environ.</u> 2004 Aug 15;329(1-3):3-16	Función respiratoria	Si
31	Bernstein JA, et al	J Allergy ClinImmunol. 2004 Nov;114(5):1116-23	Mecanismos de respuesta	No
32	Wilson AM, et al	Environ Int. 2004 Oct;30(8):1109-18	Admisiones hospitalarias	Si
33	Chen B, Hong C, Kan H	Toxicology. 2004 May 20;198(1-3):291-300	Mortalidad, morbilidad, hospitalizaciones	No
34	Graham LM	<u>PaediatrRespir Rev.</u> 2004;5Suppl A:S59-64	Asma	No

### **3.1.3. Evidencia epidemiológica en Chile**

La búsqueda de información chilena se enfocó en dos direcciones, la primera en ubicar publicaciones científicas que analizaran la asociación entre la exposición a SO<sub>2</sub> de modo de obtener información sobre funciones de riesgo chilenas y la segunda en recabar antecedentes epidemiológicos sobre el asma, uno de los principales impactos de la contaminación por este contaminante.

#### **Estudios epidemiológicos sobre el Asma**

En Chile, no hay estudios descriptivos rigurosos que permitan conocer la situación real del Asma y las variables epidemiológicas básicas de tiempo; lugar y personas; ni de variables clínicas asociadas al desarrollo de la enfermedad. Sin embargo, existe información secundaria oficial del país, con varias fuentes de información, que permiten conocer con alto grado de certidumbre la frecuencia de la enfermedad principalmente en adultos.

En relación a dichas fuentes de información, en primer lugar se encuentra la Encuesta Nacional de Salud (ENS), que toma una muestra representativa de la población del país mayor de 15 años, y en segundo lugar vale la pena destacar la base de datos de Egresos Hospitalarios que sistematiza el Ministerio de Salud desde el años 2001 para el universo de personas del país que han requerido de hospitalización, incluyendo a la población adscrita al sistema público y privado de salud. También resulta de utilidad la base de datos de atenciones de urgencia, pero ella solo se centra en los establecimientos del sistema público de salud, que comprende alrededor del 78 a 80% de la población.

La ENS es una encuesta de vigilancia epidemiológica que incluye mediciones fisiológicas que ha sido realizada por universidades del país bajo el mandato y supervisión del Ministerio Nacional de Salud, la última versión se realizó en el año 2009-2010 con el objetivo de medir la prevalencia de 42 problemas de salud del adulto en la población general chilena y describir la variación según sexo; edad; nivel socioeconómico y variables geográficas tales como zona de residencia (urbano rural), región y comuna. El propósito central de la encuesta es contribuir al conocimiento de la carga de enfermedad producida por enfermedades prioritarias del adulto en Chile y así facilitar la planificación y evaluación de estrategias promocionales, preventivas y curativas. De los 42 problemas incluidos, se encuentran: presión arterial elevada; dislipidemia; diabetes; síndrome metabólico; síntomas digestivos, síntomas cardiovasculares; daño renal crónico; cáncer de mama y síntomas respiratorios crónicos. Entre las preguntas incluidas para medir los síntomas respiratorios crónicos se encuentran entre otras:

- ¿Alguna vez un médico o doctor le ha dicho que tiene o que padece de asma?
- ¿A qué edad se lo diagnosticaron?

- ¿Alguna vez ha sido tratado por asma?
- ¿Ha estado tomando algún medicamento o haciendo algún tratamiento para el asma, durante las últimas dos semanas?

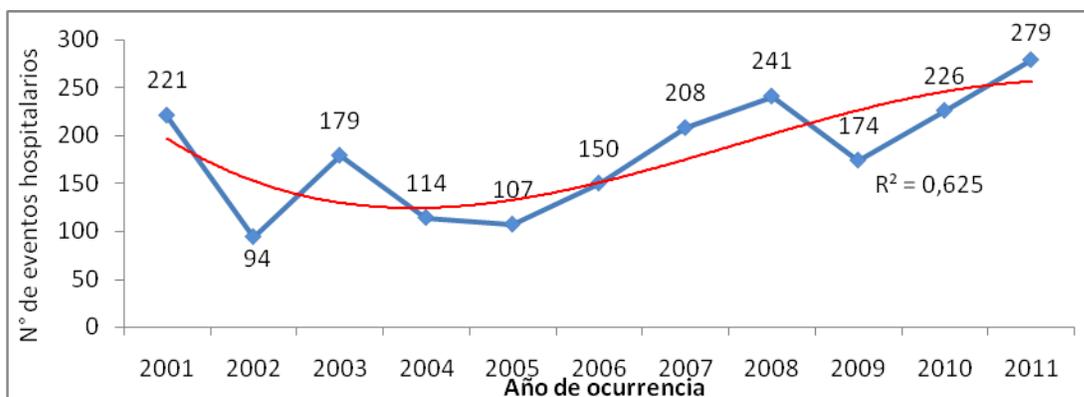
El análisis de esta información permite tener una estimación inicial de la prevalencia de asma en Chile y su relación con características demográficas; geográficas; socioeconómicas y de otras patologías incluidas en la encuesta. Sin embargo, es importante explicitar que esta estimación tiene las limitaciones propias de este tipo de investigaciones como lo es el “sesgo de memoria” inherente a este tipo de estudios. No obstante ello, la riqueza de la cantidad de variables incluidas en la encuesta; el ser representativa del total de la población del país y su rigurosidad metodológica hacen que esta información tenga en valor innegable para la elaboración de estudios descriptivos, observaciones que son la base metodológica para sustentar otros tipo de estudios de investigación.

La segunda información de tipo secundaria disponible en el país, importante de destacar son las bases de datos de Egresos Hospitalarios, estas se obtienen de la página web del Ministerio de Salud como un insumo, para que la comunidad científica académica del país genere conocimiento epidemiológico (estudios observacionales) y a partir de allí se levanten hipótesis y fundamenten otras investigaciones de más “alta evidencia científica” como puede ser un estudio analítico o experimental, ensayo clínicos randomizados entre otros. Esta información se viene sistematizando desde el año 2001 y la última base validada corresponde al año 2011.

Entre las variables que incluyen los egresos hospitalarios están las características sociodemográficas de sexo; edad; variables geográficas de región; comuna; centro hospitalarios (incluye el nombre del centro de salud ya sea público o privado); días de estadía en el centro hospitalario; condición al alta (vivo/fallecido); sistema previsional de salud y diagnóstico (causa de hospitalización) identificado con el CIE-10 (Clasificación Internacional de Enfermedades y problemas relacionados con la salud, versión 10). Naturalmente que siendo esta una base de datos de carácter oficial, no dispone de variables sensibles que permitan individualizar al paciente.

Un análisis realizado con la información de egresos hospitalarios, seleccionando los eventos de “Asma” (CIE-10: J450), se observa que entre el año 2001 al 2011 hubo un total de 1.993 hospitalizaciones con un mínimo de 94 casos el años 2002 y 279 el año 2011. La Figura 121, muestra la tendencia observada en el periodo de observación en la cual se observa una curva proyectada hacia el aumento (ver Figura 121).

Clínicamente es necesario acotar que el Asma es una condición habitualmente ambulatoria, que no requiere de hospitalizaciones, si consume en forma periódica consultas médicas generales, médicas de especialidad y kinesiología, y medicamentos en forma relativamente crónica. La tendencia observada de hospitalizaciones en ascenso estaría indicando la aparición de cuadros más graves, que llevan a la hospitalización.



**Figura 121. N° de eventos hospitalarios por asma, Chile 2001-2011.**  
Fuente: elaboración propia en base a datos del DEIS, MINSAL.

A partir de la información de los egresos hospitalarios, es posible realizar estudio ecológico observacionales, analizando las variables temporalidad (mes del año); tiempo promedio de hospitalización y estimar una tasa de “incidencia de los casos graves” puesto que son los que requieren hospitalización.

Cabe mencionar que la tasa de incidencia obtenida a partir de esta información no es la incidencia de todos los casos, puesto que estos son sólo los pacientes que requieren de hospitalización es un muy buen “proxis” para conocer la situación de cómo son los pacientes (sexo, edad); donde ocurre más frecuentemente (región; comuna; centro hospitalarios); cual es el costo estimado de la enfermedad en cuanto a días camas, días de licencias para el caso de la Población Económicamente Activa (PEA). Estos análisis tienen las limitaciones propias de un estudio ecológico, sin embargo, es un excelente sustento para demostrar el comportamiento de la patología complicada, que es la que requiere hospitalización.

Respecto del asma, la Encuesta Nacional de Salud aporta información valiosa. Con la pregunta r22<sup>17</sup>, se puede establecer la prevalencia percibida de la patología. La prevalencia percibida, entrega información sobre la frecuencia de la enfermedad, y como proviene de una muestra representativa de la realidad nacional, permite identificar las variaciones de dicha frecuencia en las distintas regiones del país. Tiene las limitaciones del sesgo de memoria, algunas personas “olvidan” o no “comprenden” lo que les informa el médico.

Es así como la Tabla 27 muestra que la región con mayor problema de asma, referido por las personas encuestadas, es la Región de Los Ríos (XIV Región en la Tabla) y la de menor prevalencia de asma es la Región de Los Lagos (X Región).

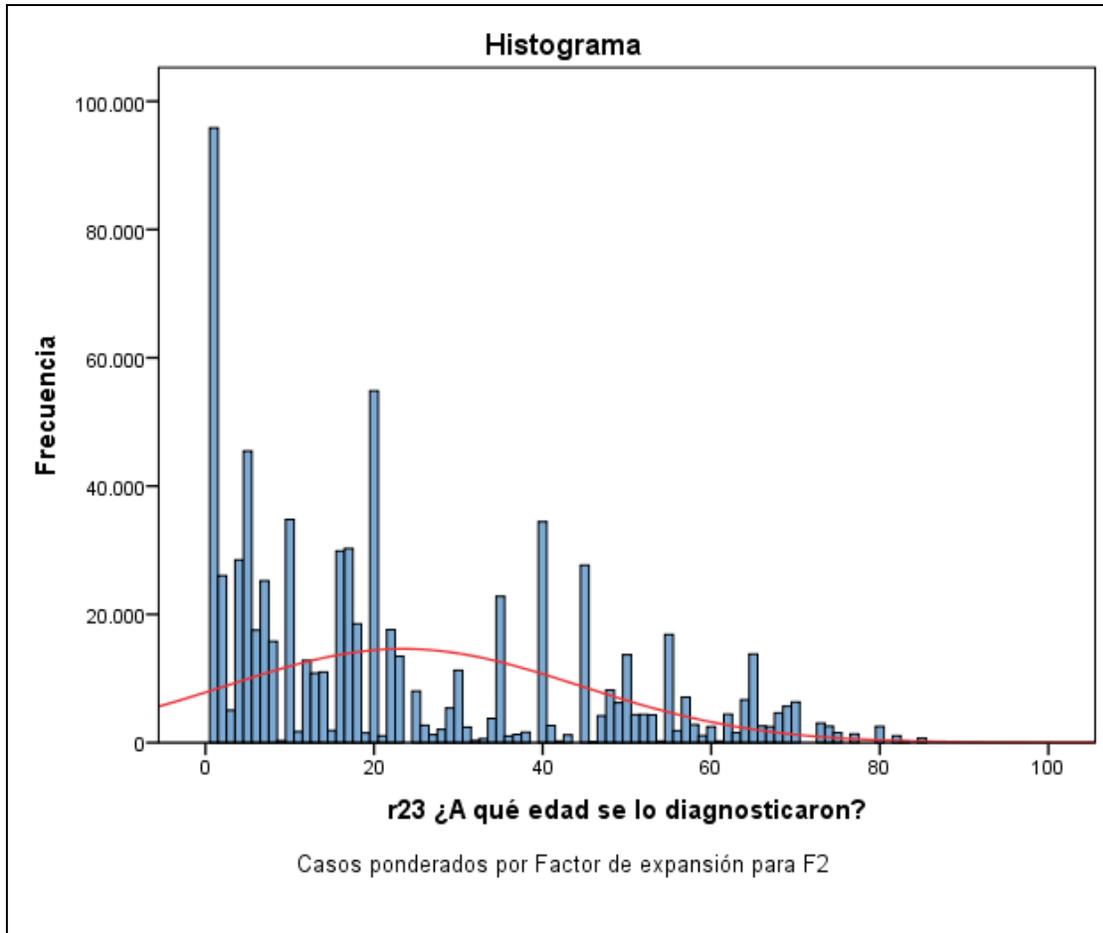
<sup>17</sup> ENS (2009) r22 “¿Alguna vez un médico o doctor le ha dicho que tiene o que padece de asma?”

**Tabla 27. Prevalencia percibida de Asma, ENS (2009-2010)**

Región	r22 ¿Alguna vez un médico o doctor le ha dicho que tiene o que padece de asma?							
	Sí		No		No sabe/No responde		Total	
	N°	% Fila	N°	% Fila	N°	% Fila	N°	% Fila
I	7.641	4,4	163.104	94,6	1.726	1,0	172.471	100,0
II	26.764	6,9	362.778	93,1	0	0,0	389.542	100,0
III	16.419	7,0	217.706	92,8	523	,2	234.648	100,0
IV	37.983	6,6	535.920	93,0	2.383	,4	576.287	100,0
V	61.283	4,5	1.293.693	95,0	7.461	,5	1.362.437	100,0
VI	38.518	5,8	621.500	93,2	7.172	1,1	667.190	100,0
VII	38.035	4,8	755.187	94,7	4.074	,5	797.296	100,0
VIII	107.407	6,8	1.464.246	93,2	0	0,0	1.571.653	100,0
IX	44.758	5,8	720.621	93,7	3.950	,5	769.328	100,0
X	15.622	2,8	539.110	97,2	0	0,0	554.731	100,0
XI	5.155	6,7	71.310	93,3	0	0,0	76.465	100,0
XII	17.847	11,0	144.508	89,0	0	0,0	162.355	100,0
RM	362.932	6,9	4.882.853	92,5	34.194	,6	5.279.979	100,0
XIV	35.457	13,5	226.387	86,5	0	0,0	261.845	100,0
XV	11.661	7,1	152.954	92,6	477	,3	165.092	100,0
Total	827.482	6,3	12.151.877	93,2	61.961	,5	13.041.319	100,0

La ENS indagó sobre la evolución de la enfermedad, consultado por la edad de diagnóstico de ella<sup>18</sup>. El gráfico siguiente muestra el comportamiento en el ciclo vital de las personas de la enfermedad. Podemos observar claramente, que esta condición se inicia en la primera mitad de la vida (antes de los 40 años) lo que tiene implicancia de salud pública, pues dependiendo del diagnóstico y tratamiento oportuno ella se puede prolongar a lo largo de toda la vida, aportando carga de enfermedad importante para los pacientes, su familia y la sociedad toda (Figura 122).

<sup>18</sup> ENS r23 ¿A qué edad se lo diagnosticaron (el asma)?



**Figura 122. Edad de diagnóstico del Asma, Chile, ENS (2009-2010)**

También indaga la ENS sobre el tratamiento de la enfermedad. Podemos observar discrepancia entre la frecuencia de diagnóstico de la enfermedad (Figura 122) y su tratamiento (Tabla 28) esto ocurre pues no todos los cuadros diagnosticados reciben tratamiento. Este indicador estaría reflejando un problema de acceso a la atención de salud de la población, pues si bien se puede dar el caso contrario, habitualmente cuando se le diagnostica de ASMA a un paciente se le prescribe tratamiento farmacológico, asociado o no a tratamiento Kinésico.

**Tabla 28. Tratamiento del Asma ENS (2009-2010)**

	r24 ¿Alguna vez ha sido tratado por asma?							
	Sí		No		No sabe/No responde		Total	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
I	6.467	3,7	166.004	96,3	0	0,0	172.471	100,0
II	24.314	6,2	365.228	93,8	0	0,0	389.542	100,0
III	12.813	5,5	221.312	94,3	523	,2	234.648	100,0
IV	35.343	6,1	538.561	93,5	2.383	,4	576.287	100,0
V	60.137	4,4	1.302.301	95,6	0	,0	1.362.437	100,0
VI	32.436	4,9	629.315	94,3	5.439	0,8	667.190	100,0
VII	38.792	4,9	755.207	94,7	3.297	,4	797.296	100,0
VIII	126.343	8,0	1.445.310	92,0	0	0,0	1.571.653	100,0
IX	43.649	5,7	721.730	93,8	3.950	,5	769.328	100,0
X	13.127	2,4	541.604	97,6	0	0,0	554.731	100,0
XI	4.596	6,0	71.870	94,0	0	0,0	76.465	100,0
XII	18.563	11,4	143.792	88,6	0	0,0	162.355	100,0
RM	346.619	6,6	4.925.475	93,3	7.886	,1	5.279.979	100,0
XIV	35.457	13,5	226.387	86,5	0	0,0	261.845	100,0
XV	12.491	7,6	152.124	92,1	477	,3	165.092	100,0
Total	811.146	6,2	12.206.218	93,6	23.955	,2	13.041.319	100,0

La pregunta sobre tratamiento durante las dos últimas semanas (Tabla 29), evita el sesgo de memoria, pero como este tipo de patología tiene un comportamiento estacional, no se puede generalizar. Es decir perfectamente puede darse que un número no menor de pacientes portadores de Asma no haya requerido tratamiento o medicación las dos semanas anteriores, lo que no descarta su condición de enfermo (Tabla 27).

**Tabla 29. Tratamiento del Asma, ENS (2009-2010)**

r25 ¿Ha estado tomando algún medicamento o haciendo algún tratamiento para el asma durante las últimas dos semanas?								
	Sí		No		No sabe/No responde		Total	
	N°	%	N°	%	N°	%	N°	%
I	3.605	2,1	168.866	97,9	0	0,0	172.471	100,0
II	6.603	1,7	382.564	98,2	376	0,1	389.542	100,0
III	3.029	1,3	230.572	98,3	1.047	,4	234.648	100,0
IV	11.038	1,9	565.249	98,1	0	,0	576.287	100,0
V	11.425	0,8	1.351.012	99,2	0	,0	1.362.437	100,0
VI	9.840	1,5	657.350	98,5	0	0,0	667.190	100,0
VII	9.337	1,2	784.662	98,4	3.297	,4	797.296	100,0
VIII	44.238	2,8	1.527.415	97,2	0	0,0	1.571.653	100,0
IX	19.592	2,5	745.786	96,9	3.950	,5	769.328	100,0
X	4.080	0,7	550.652	99,3	0	0,0	554.731	100,0
XI	878	1,1	75.587	98,9	0	0,0	76.465	100,0
XII	2.696	1,7	159.658	98,3	0	0,0	162.355	100,0
RM	157.507	3,0	5.122.472	97,0	0	,0	5.279.979	100,0
XIV	9.735	3,7	252.109	96,3	0	0,0	261.845	100,0
XV	1.513	0,9	163.101	98,8	477	,3	165.092	100,0
Total	295.117	2,3	12.737.055	97,7	9.147	,1	13.041.319	100,0

### Carga Global de enfermedad atribuible a contaminación por SO<sub>2</sub>

Tomando en consideración todos los antecedentes recolectados sobre los efectos en la salud de la exposición a dióxido de azufre y el comportamiento de las enfermedades o condiciones relacionadas en Chile se estimó la carga global de enfermedad que este contaminante estaría infligiendo en la salud pública del país.

El análisis de las publicaciones científicas realizadas en Chile permitió identificar las siguientes condiciones (Tabla 30):

- Síntomas Respiratorios en niños
- Mortalidad no accidental
- Hospitalizaciones por Migraña
- Hospitalizaciones por Embolia Pulmonar
- Hospitalizaciones por complicaciones agudas de la Diabetes.

Como ninguna publicación chilena se refirió al asma, se decidió estimar la carga de enfermedad, utilizando la dosis-función del estudio de Pan G, 2010 (Tabla 6)<sup>19</sup>. Para el cálculo de los AVISA se utilizaron las referencias señaladas en la Tabla 30 y Tabla 31.

**Tabla 30. Publicaciones científicas sobre efectos del SO<sub>2</sub> en Chile**

Tipo de efecto estudiado, autor, año	Resultados
Efectos agudos de las partículas respirables y del dióxido de azufre sobre la salud respiratoria en niños del área industrial de Puchuncaví, Chile. Sanchez, Rev Panam Salud 1999 <sup>20</sup> .	por 50 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> -1,42 L/min (-2,84 a -0,71) en FEM 5% (RP = 1,05: 1,00 a 1,10) expectoración
Air Pollution and Mortality in Chile: Susceptibility among the Elderly, Cakmak EHP 2007	36,9 µg/m <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> <65 años 4.77% > 85 años 7.92%
Air Pollution and Hospitalization for Headache in Chile, Dales AJ Epid 2009	16,25 µg/m <sup>3</sup> en SO <sub>2</sub> 1.10 ( 1.04, 1.17)
Air Pollution and Hospitalization for venous thromboembolic disease in Chile, Dales J Throm 2010	Para 15,33 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 1.08 (1.03, 1.12)
Air Pollution and hospitalization for acute complications of diabetes in Chile, Dales Environ Int, 2012	(IQR=5.88) RR 1.14 (1.06, 1.22)

IQR = Rango Inter-cuartílico

<sup>19</sup> Pan G<sup>1</sup>, Zhang S, Feng Y, Takahashi K, Kagawa J, Yu L, Wang P, Liu M, Liu Q, Hou S, Pan B, Li J. Air pollution and children's respiratory symptoms in six cities of Northern China. *Respir Med.* 2010 Dec;104(12):1903-11. doi: 10.1016/j.rmed.2010.07.018.

<sup>20</sup> Esta no es una publicación ISI, por lo que no aparece en la búsqueda bibliográfica, pues corresponde al Boletín de la Oficina Panamericana de la Salud (OPS).

**Tabla 31. Funciones de riesgo del SO<sub>2</sub> utilizadas para el cálculo de los AVISA**

Efecto, autor, año	Resultados
Asma, Pan G, Resp Med 2010	1,52(1,21-1,92)
Bajo peso de nacimiento, Dugandzic Env H 2006	RR: 1,36, (1,04 – 1,78)
Consultas por Depresión, Szyszkowicz 2007	4,5 (0,1% - 9,1%)
Malformaciones congénitas, Gilboa SM Am J epid 2005	OR = 2,16( 1,51- 3,09)
Atenciones de Urgencia Respiratoria, Tramuto, Env Health, 2011	OR= 1,068(1,014-1,126)

El resultado de los años de vida ajustados por discapacidad, AVISA atribuibles, a la exposición de dióxido de azufre, bajo el supuesto de exposición al contaminante en los valores descritos para todo el país, se detalla en la Tabla 32.

**Tabla 32. Estimación de AVISA atribuible por enfermedades asociadas a la exposición a SO<sub>2</sub>**

Enfermedades	Total AVISA(2007)	Función de riesgo	IQR SO <sub>2</sub>	AVISA Atribuible
ASMA <sup>21</sup>	21168	1,52 (1,21-1,92)	69000000	7242
Diabetes Mellitus <sup>22</sup>	72230	1,14 (1,06-1,22)	15,41	8870
Migraña <sup>23</sup>	34112	1,1 (1,04-1,17)	16,25	3101
Enfermedad Cerebrovascular <sup>24</sup>	70811	1,08 (1,03-1,12)	15,33	5245
Bajo Peso Nacimiento <sup>25</sup>	18354	1,36 (1,04 -1,78)	36,69- 18,34	4858
Malformación Congénita Cardíaca <sup>26</sup>	11270	2,16 (1,51-3,0)	7,1 -3,4	6052
Depresión <sup>27</sup>	168929	1,045 (1,001-1,09)	5	7274

IQR = Rango Intercuartílico de SO<sub>2</sub>

La Tabla 33 resume resultados de la carga de enfermedad atribuible a la exposición atmosférica a SO<sub>2</sub>, bajo los supuestos de exposición de los estudios utilizados y los efectos registrados en Chile.

**Tabla 33. Carga global de Enfermedad atribuible a la exposición a SO<sub>2</sub>, estimación país**

Indicador	Número observado, (año)	Número Atribuido al SO <sub>2</sub>
AVISA <sup>28</sup>	3.741.798 (2007)	42.644 (15.818 - 65.467)
Asma <sup>29</sup>	1.115.793 (2009)	381.719 (193.650 -534.651)
Mortalidad <sup>30</sup>	94.985 (2011)	4.646 - 7715
Hospitalizaciones por Diabetes <sup>31</sup>	20.372 (2011)	2.502(1.153-3.674)
Urgencias Respiratorias <sup>32</sup>	202.402(2013)	12.887 (2.795 – 22649)

### 3.1.4. Evidencia epidemiológica internacional

<sup>21</sup> Pan et al Respir Med. 2010 Dec;104(12):1903-11

<sup>22</sup> Dales et al J ThrombHaemost. 2010 Apr;8(4):669-7

<sup>23</sup> Dales et al Am J Epidemiol. 2009 Oct 15;170(8):1057-66

<sup>24</sup> Dales J et al ThrombHaemost. 2010 Apr;8(4):669-7

<sup>25</sup> Dugandzic Environ Health. 2006 Feb 17;5:3

<sup>26</sup> Gilboa et al Am J Epidemiol. 2005 Aug 1;162(3):238-52. Epub 2005 Jun 29.

<sup>27</sup> Szyszkowicz Int J Occup Med Environ Health. 2007;20(3):241-5

<sup>28</sup> Minsal Estudio de Carga de Enfermedad y Carga Atribuible 2007 <http://epi.minsal.cl/estudios-y-encuestas-poblacionales/estudios/>

<sup>29</sup> Minsal Encuesta Nacional de Salud 2006 <http://epi.minsal.cl/estudios-y-encuestas-poblacionales/estudios/>

<sup>30</sup> DEIS, registro mortalidad ,2011

<sup>31</sup> DEIS, registro egresos hospitalarios, 2011

<sup>32</sup> DEIS, registro atenciones de urgencia, 2013

Existe, desde hace más de dos décadas, una nutrida literatura referente a los efectos de la contaminación atmosférica en las personas y esta ha demostrado en forma consistente los daños a la salud que ella provoca.

Los estudios epidemiológicos, a diferencia de los toxicológicos, son principalmente observacionales, por lo que los investigadores no modifican las variables evaluadas y establecen sus conclusiones a partir de observaciones empíricas de la realidad.

La contaminación atmosférica, por su lado, es una situación compleja en la que habitualmente participan varios contaminantes, es muy poco frecuente que la contaminación existente en un lugar se deba a un solo contaminante, por lo que separar los efectos de cada uno de ellos es un desafío importante, que aún no se ha resuelto completamente. Requiere de esfuerzos analíticos y de modelación rigurosos que muchas veces no se han podido establecer en los estudios reportados.

Por lo tanto en esta revisión se ha podido evidenciar resultados no concluyentes para algunos gases, entre ellos el dióxido de azufre, no ocurre lo mismo con la contundencia de los efectos descritos para el material particulado respirable.

La revisión sistemática de las publicaciones científicas publicadas desde el año 2004 a la fecha, y que completó los criterios de inclusión, es decir evaluaban efectos sobre la salud del SO<sub>2</sub> indicó que del total de 143 publicaciones que estudiaban los efectos del contaminante en la salud humana en el 75% (106 publicaciones) se estableció una asociación estadísticamente significativa entre el contaminante y el efecto estudiado (Figura 123).



**Figura 123. Porcentaje de resultados con asociación entre exposición a SO<sub>2</sub> y distintos efectos sobre la salud (Nº total de publicaciones: 43). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.**

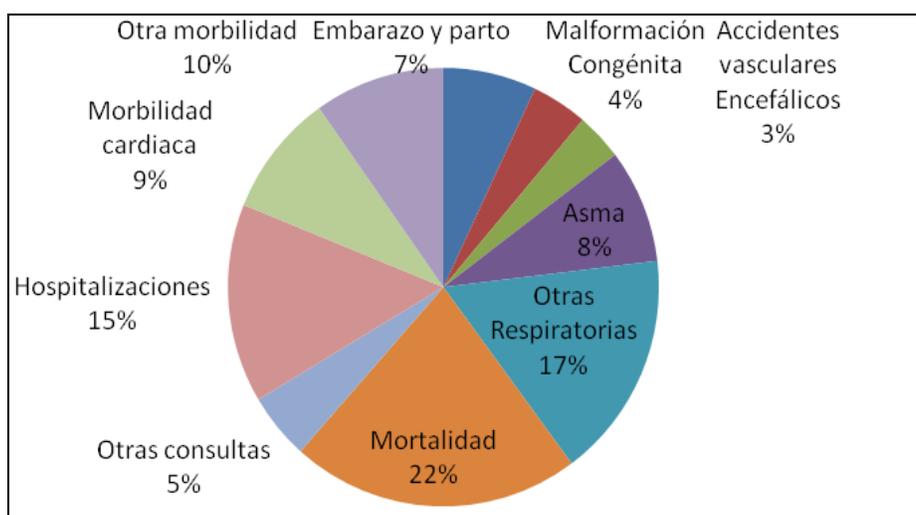
Otra evidencia observada de la revisión de la literatura recientemente publicada es que se ha ampliado el rango de efectos en la salud estudiados. Clásicamente la contaminación atmosférica había sido asociada a efectos respiratorios y cardiovasculares por medio del estudio de la mortalidad, las consultas y las hospitalizaciones. Las causas relacionadas con las hospitalizaciones son problemas respiratorios y cardiovasculares.

Sin embargo, de forma más reciente, se ha podido observar que los investigadores han dirigido su interés, además, a la búsqueda de otros efectos sobre la salud de la población como son los efectos sobre el parto (peso de nacimiento y parto prematuro), malformaciones congénitas, consumo de medicamentos, modificaciones genéticas entre otras entidades (Figura 124).

Analizando los efectos estudiado se observa también que un número de ellos presenta alto nivel de concordancia, a nivel de la significación estadística, de los resultados encontrados. Un número importante de los artículos presentan resultados en la misma dirección, es decir presencia de asociación u ausencia de ella.

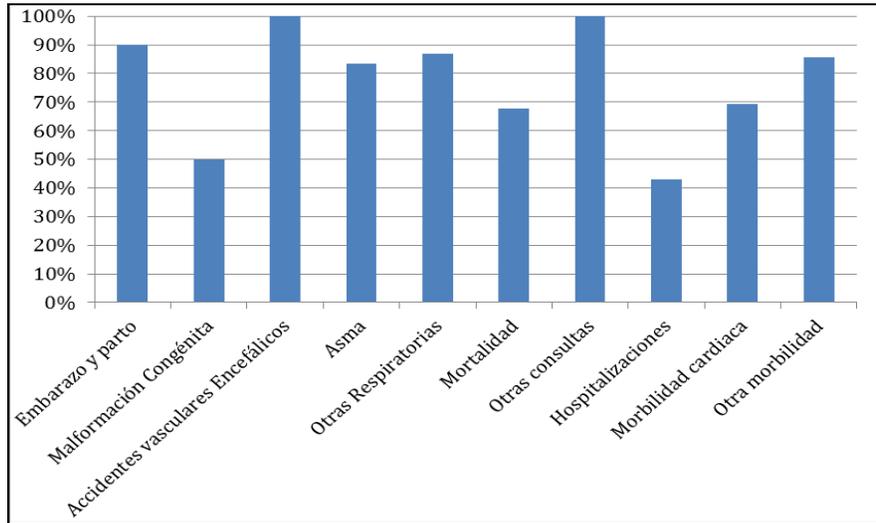
Sobre el 80% de las publicaciones referidas a los efectos sobre el embarazo y parto, los accidentes vasculares encefálicos, el asma, otras morbilidades respiratorias y consultas generales coinciden en encontrar asociación entre distintos rangos de exposición y las personas (Figura 125).

En cambio los estudios sobre hospitalizaciones y malformaciones congénitas se dividen prácticamente 1:1 entre los que encuentran y no encuentran asociaciones estadísticas (Figura 125).



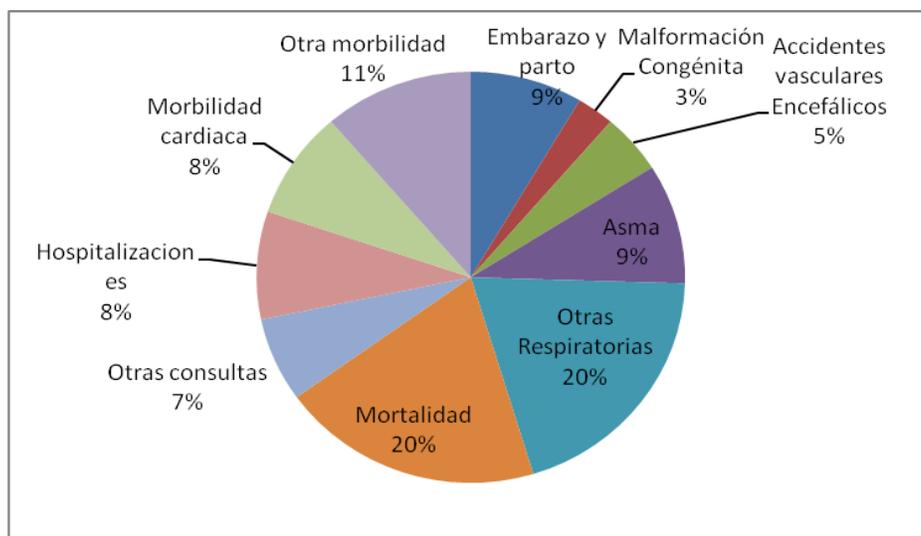
**Figura 124. Tipo de efecto estudiado (Nº total de publicaciones: 143). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.**

Las hospitalizaciones reportadas por los estudios se refieren a hospitalizaciones por causa respiratoria o cardiovascular.



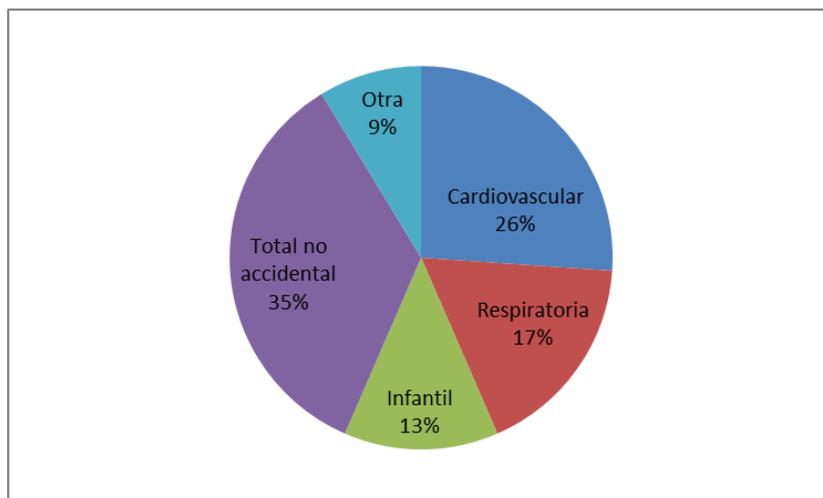
**Figura 125. Resultados de la concordancia en la asociación entre exposición a SO<sub>2</sub> y distintos tipos de efectos (%). Fuente: Elaboración propia a partir de revisión sistemática con buscador PubMed.**

Analizando solo el universo de los estudios que publican resultados significativos de los efectos de la exposición a SO<sub>2</sub>, se puede observar que un número importante de ellos encontró efecto sobre la mortalidad, morbilidad por asma y otras afecciones respiratorias (Figura 126).



**Figura 126. Tipo de efectos significativos reportados por 106 publicaciones (2004-2014). Fuente: elaboración propia a partir de revisión sistemática PubMed**

El tipo de mortalidad estudiado se puede observar en la Figura 127.



**Figura 127. Mortalidad asociada positivamente a la exposición a SO<sub>2</sub> (N = 21 estudios). Fuente: elaboración propia a partir de revisión sistemática PubMed**

Respecto de los resultados estadísticos encontrados y particularmente de las funciones dosis respuesta, también denominadas funciones de riesgo, reportadas, la Tabla 35 resume la información de las publicaciones que no encontraron efectos del SO<sub>2</sub> y la Tabla 36 las que sí lo hallaron.

En esta última se observa, y es lo esperable en relación a la contaminación atmosférica, que las distintas funciones de riesgo varían de publicación en publicación, sin embargo todas se encuentran en el rango de asociaciones débiles o de escasa magnitud. Sin embargo estas pequeñas asociaciones, generalmente bajo el umbral del 10%, al afectar a toda la población, pues nadie puede evitar exponerse al aire comunitario, implican un problema de salud pública no despreciable.

La magnitud del problema, es decir la cantidad de personas afectadas depende de dichas funciones, de la cantidad de personas expuestas (tamaño de las comunas) y de la intensidad de la exposición o concentración del contaminante en el aire, factores que determinan fuertemente la dosis de exposición y por lo tanto la magnitud de los efectos.

### Evidencia sobre los efectos agudos y crónicos

La exposición a dióxido de azufre puede producir variados efectos sobre el organismo, dependiendo de las dosis y las personas expuestas. Los mecanismos fisio-patológicos involucrados se describieron en el apartado de evidencia toxicológica.

Desde un punto de vista epidemiológico, la evidencia científica muestra que se han observado efectos agudos y efectos crónicos tal como lo indica la Tabla 36, que lista desde síntomas, consultas, hospitalizaciones, muertes, eventos agudos (Infarto Agudo al Miocardio por ejemplo) a eventos crónicos como la alteración al desarrollo psicomotor.

Las revisiones sistemáticas siguen mostrando prominencia de los efectos agudos sobre los crónicos, y esto se debe al gran volumen de estudios realizados sobre los efectos agudos. La revisión sistemática incluyó seis meta-análisis se resumen en la Tabla 34 siguiente.

Sin embargo la evidencia actual sobre efectos crónicos en la salud cardiovascular, la salud infantil y la salud respiratoria de adultos permite afirmar que los efectos de exposiciones crónicas al dióxido de azufre también son relevantes para la salud pública (Tabla 34).

Respecto de la mortalidad, la gran mayoría de los estudios que sugieren que la exposición prolongada a contaminantes atmosférico también induce sobre la mortalidad por enfermedades crónicas provienen de estudios de cohorte realizados en Estados Unidos<sup>33 34 35</sup>. Dichos se han tradicionalmente focalizado en los efectos del material

<sup>33</sup> Chen H, et al A Systematic review of the relation between long-term exposure to ambient air pollution and chronic disease. Rev Environ Health 2008;23:243-297.

<sup>34</sup> Dockery DW, Pope CA, 3rd, Xu X. An association between air pollution and mortality in six US cities. N Engl J Med. 1993;329:1753-1759.

particulado fino. El estudio de Carey analiza la exposición a los contaminantes criterios de una cohorte importante de ingleses, controla los factores de confusión de edad, sexo, tabaquismo, Índice de Masa Corporal y educación, encontrando efectos crónicos del SO<sub>2</sub> sobre enfermedad respiratoria y cardiovascular, no así sobre el cáncer pulmonar.

**Tabla 34. Meta – análisis, efectos sobre la salud de la exposición a SO<sub>2</sub>**

Título, autor, año	Resultados entregados
Global association of air pollution and heart failure: a systematic review and meta-analysis, Shah, 2013	Este artículo estudia los efectos de la exposición aguda a contaminantes atmosféricos ((MP <sub>10</sub> , MP <sub>2,5</sub> , dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono) sobre la insuficiencia cardíaca (hospitalizaciones y mortalidad).
Ambient air pollution and risk of congenital anomalies: a systematic review and meta-analysis, Vrijheid, 2011	Entrega los resultados de la re- evaluación de 4 estudios sobre malformaciones congénitas y exposición a varios contaminantes atmosféricos ((MP <sub>10</sub> , dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono). Encontraron evidencia de asociación para los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre, solamente.
Drug consumption and air pollution: an overview, Menichini, 2010	El artículo analiza los resultados de 31 publicaciones sobre los efectos de exposiciones agudas en el consumo de medicamentos de pacientes asmáticos y respiratorios.
Air pollution, aeroallergens, and emergency room visits for acute respiratory diseases and gastroenteric disorders among young children in six Italian cities, Orazzo, 2009	Este artículo estudia exposiciones y efectos agudos. Se refiere a la asociación entre las consultas de niños a servicios de emergencia por causas respiratorias y digestivas en seis ciudades italianas. Evalúa el efecto de varios contaminantes (MP <sub>10</sub> , dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono). Encontrando efecto para la presencia de sibilancias.
Chronic exposure to outdoor air pollution and lung function in adults, Forbes, 2009	Evalúa en qué medida la exposición crónica a contaminantes ambientales (MP <sub>10</sub> , dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y ozono) produce efecto sobre la función pulmonar. Se analizaron los resultados de 4 encuestas poblacionales (1995, 1996, 1997 y 2001).
Exposure-response functions for health effects of ambient air pollution applicable for China -- a meta-analysis, Aunan, 2004	Este artículo propone funciones dosis/respuesta sobre la base de estudios epidemiológicos realizados en China. Deriva funciones para efectos agudos (hospitalizaciones respiratorias y cardiovasculares; y muertes totales, respiratorias y cardiovasculares) tanto para SO <sub>2</sub> , como material particulado. Deriva también una función para efectos crónicos, solamente para el material particulado.

<sup>35</sup> Pope CA, 3rd, Burnett RT, Thurston GD. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease. *Circulation* 2004;109:71-77

**Tabla 35. Publicaciones sin hallazgo de efectos por SO<sub>2</sub>, por tipo de efecto estudiado**

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>
Altuğ H, Gaga EO, Döğeroğlu T, Brunekreef B, Hoek G, Van Doorn W	<a href="#">Sci Total Environ. 2014 May 1;479-480:201-9.</a>	Efectos respiratorios en escolares
Park M, Luo S, Kwon J, Stock TH, Delclos G, Kim H, Yun-Chul H.	<a href="#">Air Qual Atmos Health. 2013 Sep 1;6(3)</a>	Hospitalizaciones por Asma
Altuğ H, Gaga EO, Döğeroğlu T, Ozden O, Ornektekin S, Brunekreef B, Meliefste K, Hoek G, Van Doorn W.	<a href="#">Environ SciPollut Res Int. 2013 Sep;20(9):6455-67</a>	Función pulmonar, asma, rinitis en escolares
<a href="#">Milojevic A, et al</a>	<a href="#">Heart. 2014 Jul 15;100(14):1093-8.</a>	Infarto Agudo al Miocardio
<a href="#">Liu MM, et al</a>	<a href="#">J Epidemiol. 2013;23(4):280-7</a>	Salud respiratoria de escolares (sibilancias – asma)
Lee PC, Talbott EO, Roberts JM, Catov JM, Bilonick RA, Stone RA, Sharma RK, Ritz B.	<a href="#">Environ Res. 2012 Aug;117:46-53</a>	Hipertensión en el embarazo
Kim JH, Hong YC.	<a href="#">Environ Health Perspect. 2012 Oct;120(10)</a>	Polimorfismo y resistencia a la insulina
<a href="#">Dong GH, et al</a>	<a href="#">Respiration. 2012;84(5):360-8</a>	Mortalidad respiratoria
<a href="#">Zhang P, et al</a>	<a href="#">PLoS One. 2011;6(6):e20827</a>	Mortalidad cardiovascular
<a href="#">Rajarithnam U, et al</a>	<a href="#">Res Rep Health Eff Inst. 2011 Mar;(157):47-74</a>	Mortalidad
Namdeo A, Tiwary A, Farrow E.	<a href="#">Environ Int. 2011 Jul;37(5):829-37</a>	Hospitalizaciones
Dadvand P, Rankin J, Rushton S, Pless-Mulloli T.	<a href="#">Environ Res. 2011 Apr;111(3):435-4</a>	Malformaciones Congénitas Cardiacas
Dadvand P, Rankin J, Rushton S, Pless-Mulloli T.	<a href="#">Am J Epidemiol. 2011 Jan 15;173(2):171-82</a>	Malformaciones Congénitas Cardiacas
Chen R, Pan G, Kan H, Tan J, Song W, Wu Z, Xu X, Xu Q, Jiang C, Chen B.	<a href="#">Sci Total Environ. 2010 Nov 15;408(24):6086-91</a>	Mortalidad cardiovascular
Hsieh YL, Yang YH, Wu TN, Yang CY.	<a href="#">J Toxicol Environ Health A. 2010;73(11):757-65</a>	Hospitalizaciones por Infarto Agudo al Miocardio

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>
Anderson HR, Armstrong B, Hajat S, Harrison R, Monk V, Poloniecki J, Timmis A, Wilkinson P.	Epidemiology. 2010 May;21(3):405-13	Implante de desfibrilador cardiaco
Hwang BF, Lee YL.	Chest. 2010 Oct;138(4):956-64	Prevalencia de síntomas de bronquitis
Baja ES, Schwartz JD, Wellenius GA, Coull BA, Zanobetti A, Vokonas PS, Suh HH.	Environ Health Perspect. 2010 Jun;118(6):840-6	Alteración Intervalo Q-T*
Marshall EG, Harris G, Wartenberg D.	Birth Defects Res A Clin Mol Teratol. 2010 Apr;88(4):205-15.	Labio leporino
Cheng MF, Tsai SS, Yang CY.	J Toxicol Environ Health A. 2009;72(19):1135-40	Hospitalizaciones por Infarto Agudo al Miocardio
Neupane B, Jerrett M, Burnett RT, Marrie T, Arain A, Loeb M.	Am J Respir Crit Care Med. 2010 Jan 1;181(1):47-53	Hospitalizaciones por neumonía adulto mayor
Brunekreef B, Beelen R, Hoek G, Schouten L, Bausch-Goldbohm S, Fischer P, Armstrong B, Hughes E, Jerrett M, van den Brandt P.	Res Rep Health Eff Inst. 2009 Mar;(139):5-71	Mortalidad cardiovascular y respiratoria, exposición prolongada
Stieb DM, Szyszkowicz M, Rowe BH, Leech JA.	Environ Health. 2009 Jun 10;8:25	Urgencias respiratorias y cardiacas
Milutinović S, Nikić D, Stosić L, Stanković A, Bogdanović D.	Cent Eur J Public Health. 2009 Mar;17(1):8-13.	Emergencias respiratorias
Berglind N et al	Epidemiology. 2009 Jan;20(1):110-8	Mortalidad sobrevivientes de IAM**
Wong CM, et al	Environ Health Perspect. 2008 Sep;116(9):1189-94	Mortalidad
He Q, Wu SL, Xu F, Duan JJ, Nie SF, Cao YG.	Zhonghua Liu Xing Bing Xue Za Zhi. 2007 Dec28(12):1175-8.	Cáncer
Beelen R, et al	Environ Health Perspect. 2008 Feb;116(2):196-202	Mortalidad
Woodruff TJ, Darrow LA, Parker JD.	Environ Health Perspect. 2008 Jan;116(1):110-5	Mortalidad Infantil post neonatal
Metzger KB, Klein M, Flanders WD, Peel JL, Mulholland JA, Langberg JJ, Tolbert PE.	Epidemiology. 2007 Sep;18(5):585-92.	Arritmias cardiacas
Qian Z, He Q, Lin HM, Kong L, Liao D, Yang N, Bentley CM, Xu S.	J Air Waste Manag Assoc. 2007 Jul;57(7):785-93.	Mortalidad

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>
Lee IM, Tsai SS, Ho CK, Chiu HF, Yang CY.	Inhal Toxicol. 2007 Aug;19(10):899-904.	Hospitalizaciones por Insuficiencia Cardíaca Congestiva
Yang CY1, Chen CJ.	Toxicol Environ Health A. 2007 Jul;70(14):1214-9.	Hospitalizaciones por EPOC***
Jalaludin B, Mannes T, Morgan G, Lincoln D, Sheppard V, Corbett S.	Environ Health. 2007 Jun 7;6:16.	Edad gestacional
Yang CY, Chen CC, Chen CY, Kuo HW.	J Toxicol Environ Health A. 2007 Jan 15;70(2):111-7	Hospitalizaciones por asma
Lee IM, Tsai SS, Chang CC, Ho CK, Yang CY.	Inhal Toxicol. 2007 May;19(5):393-8.	Hospitalizaciones por EPOC
Liu S, Krewski D, Shi Y, Chen Y, Burnett RT.	J Expo Sci Environ Epidemiol. 2007 Aug;17(5):426-32. Epub 2006 May 31	Crecimiento fetal
Tsai SS1, Cheng MH, Chiu HF, Wu TN, Yang CY.	Inhal Toxicol. 2006 Jul;18(8):549-54.	Hospitalizaciones por asma
Rosenlund M, Berglund N, Pershagen G, Hallqvist J, Jonson T, Bellander T.	Epidemiology. 2006 Jul;17(4):383-90	Infarto al Miocardio y exposición largo plazo
Lagorio S, Forastiere F, Pistelli R, Iavarone I, Michelozzi P, Fano V, Marconi A, Ziemacki G, Ostro BD.	Environ Health. 2006 May 5;5:11	Función pulmonar en personas susceptible
Chan CC, Chuang KJ, Chien LC, Chen WJ, Chang WT.	Eur Heart J. 2006 May;27(10):1238-44. Epub 2006 Mar 14.	Hospitalizaciones por Accidente Vascular Encefálico
Tsai SS1, Chen CC, Hsieh HJ, Chang CC, Yang CY.	Inhal Toxicol. 2006 Mar;18(3):185-9.	Mortalidad post-neonatal
Hosseinpour AR, Forouzanfar MH, Yunesian M, Asghari F, Naieni KH, Farhood D.	Environ Res. 2005 Sep;99(1):126-31.	Hospitalizaciones por Angina
Schwartz J, et al	Thorax. 2005 Jun;60(6):455-61	Arritmia
Kan HD, Chen BH, Fu CW, Yu SZ, Mu LN.	Biomed Environ Sci. 2005 Feb;18(1):1-4.	Mortalidad por SARS****

\*Intervalo Q-T: Es una representación gráfica del funcionamiento cardíaco al Electrocardiograma.

\*\*IAM : Infarto Agudo al Miocardio

\*\*\*EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica

\*\*\*\*SARS: Síndrome Respiratorio Agudo Severo debido a coronavirus

**Tabla 36. publicaciones que reportan efectos del SO<sub>2</sub>**

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
<u>Yang WS, Wang X, Deng Q, Fan WY, Wang WY.</u>	<u>Int J Cardiol.</u> 2014 May 17. pii: S0167-5273(14)01027-4	Accidente Vascular Encefálico y mortalidad	RR: 1.53% (0.66-2.41) por 10 ppb de SO <sub>2</sub>
<u>Shah AS, et al</u>	<u>Lancet.</u> 2013 Sep 21;382(9897):1039-48	Insuficiencia Cardiaca	por 10 ppb de SO <sub>2</sub> 2.36% (1.35–3.38)
<u>Männistö T, Mendola P, Liu D, Leishear K, Sherman S, Laughon SK.</u>	<u>Am J Hypertens.</u> 2014 May 2.	Hipertensión al parto	OR: 0.3% por 1ppb de SO <sub>2</sub>
Wiwatanadate P	J Environ Health. 2014 Jan-Feb;76(6):76-84	Síntomas ojos, piel.	OR: 1.205 a 2.948
Zhou N, et al	Environ Pollut. 2014 Apr;187:145-52.	Calidad del semen	Asociación inversa con morfología normal de los espermios
Nardocci AC, Freitas CU, Ponce de Leon AC, Junger WL, GouveiaNda C	Cad SaudePublica. 2013 Sep;29(9):1867-76	Hospitalizaciones cardiovasculares adultos >39 años	3.51% (1.24; 5.83)
<u>Vanos JK, Cakmak S, Bristow C, Brion V, Tremblay N, Martin SL, Sheridan SS</u>	<u>Environ Res.</u> 2013 Oct;126:66-75	Mortalidad, adulto mayor (64 a 85 años)	RR: 1.5%
<u>Liu L, et al</u>	<u>Int J Hyg Environ Health.</u> 2014	Pulso cardiaco	0.26 bpm* (0.01, 0.51)
<u>Qian Y, Zhu M, Cai B, Yang Q, Kan H, Song G, Jin W, Han M, Wang C</u>	<u>J Epidemiol Community Health.</u> 2013 Aug; 67(8):635-40.	Mortalidad por Accidente Vascular Encefálico	% aumento mortalidad con 10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> . Lag <sub>0</sub> 0.43(0.07-0.79) Lag <sub>1</sub> 0.58(0.23-0.92) Lag <sub>2</sub> 0.74(0.41-1.07) Lag <sub>3</sub> 0.52(0.18-0.85)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
Carey IM, Atkinson RW, Kent AJ, van Staa T, Cook DG, Anderson HR.	Am J Respir Crit Care Med. 2013 Jun 1;187(11):1226-33.	Mortalidad todas las causas Mortalidad Respiratoria Mortalidad Cáncer pulmonar Mortalidad Cardiovascular	HR 1.03(1.01-1.05) HR 1.07(1.04-1.10) HR 1.03(0.99-1.11) HR 1.03(1.01-1.05)
<u>Orazzo F</u> , et al	<u>Environ Health Perspect.</u> 2009 Nov;117(11):1780-5	Consultas Emergencias Respiratorias	Aumento de 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO <sub>2</sub> 3.4% ( 1.5-5.3)
<u>Forbes L</u> , et al	<u>Thorax.</u> 2009 Aug;64(8):657-63	Disminución del VEF1	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aumento SO <sub>2</sub> 0,7% de disminución
Nieminen P et al	Int J Circumpolar Health. 2013;72	Tos y expectoración	OR 2.16, 95% CI 1.07-4.35
Chen R, Zhang Y, Yang C, Zhao Z, Xu X, Kan H.	Stroke. 2013 Apr;44(4):954-60	Mortalidad por accidente vascular encefálico	% aumento en Lag <sub>2</sub> con 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO <sub>2</sub> 0.88% ( 0.54-1.22)
Ching-Chun Lin, et al	Int. J. Environ. Res. Public Health 2014, 11, 6827-6841	Desarrollo psicomotor en lactantes	La exposición a bajos niveles de SO <sub>2</sub> antes del nacimiento y hasta 18 meses después podrían provocar disminución en el desarrollo psicomotor.
YumingGuo, et al	<u>Sci Rep.</u> 2014 Jul 1;4:5509	Mortalidad no accidental	Aumento de 1 ppb SO <sub>2</sub> 0.34% (0.17 - 0.50%)
Chau-Ren Jung, Yu-Ting Lin, and Bing-Fang Hwang	<u>PLoSOne.</u> 2013 Sep 25;8(9)	Autismo	HR por 1 ppb de SO <sub>2</sub> 17% ( 1.09-1.27)
<u>Dong GH</u> , et al	<u>Hypertension.</u> 2013 Mar;61(3):578-84	Hipertensión (solo en hombres)	OR por 20 $\mu\text{m}^3$ de SO <sub>2</sub> 1.19 ( 1.05-1.34)
<u>Kara E</u> , et al	<u>Environ Sci Pollut Res Int.</u> 2013 Jun;20(6):4225-34	Asma (hombres de 45 a 64 años)	Se demostró correlación positiva
<u>Wang M</u> , et al	<u>WeiShengYanJiu.</u> 2012 Sep;41(5):771-5	Hospitalizaciones por enfermedad respiratoria	1.048 (95% CI 1.031-1.065)
<u>Geer LA</u> , <u>Weedon J</u> , <u>Bell ML</u> .	<u>J Air Waste Manag Assoc.</u> 2012 Nov;62(11):1285-95	Reducción peso nacimiento	IQR de SO <sub>2</sub> 4.99-g (1.87-8.11)
<u>Le TG</u> , <u>Ng L</u> , <u>Mehta S</u> , <u>Do VD</u> , <u>Thach TQ</u> , <u>Vu XD</u> , <u>Nguyen DT</u> , <u>Cohen A</u> .	<u>Res Rep Health Eff Inst.</u> 2012 Jun;(169):5-72	Hospitalizaciones por Infección Respiratoria Baja en niños	5.85% ( 0.44-11.55)
<u>Chen R</u> , et al	<u>Environ Res.</u> 2012 Oct;118:101-6	Mortalidad diaria	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio de 2 días de SO <sub>2</sub> 0.75% (0.47 to 1.02)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
<u>Nascimento LF</u> , et al	<u>CadSaudePublica</u> . 2012 Jul;28(7):1319-24	Accidente Vascular Encefálico, hospitalizaciones	Lag 0 : 1.029 (1.000-1.060)
<u>Dales RE</u> , <u>Cakmak S</u> , <u>Vidal CB</u> , <u>Rubio MA</u> .	<u>EnvironInt</u> . 2012 Oct 1;46:1-5	Diabetes descompensada, Santiago de Chile	(IQR=5.88 ppb) RR 1.14 (1.06, 1.22)
<u>Huang XL</u> , <u>Dai LZ</u> , <u>Lu P</u> , <u>Shang Y</u> , <u>Li Y</u> , <u>Tao YB</u> , <u>Huang W</u> .	<u>Zhonghua Liu Xing Bing XueZaZhi</u> . 2012 Feb;33(2):210-4	Mortalidad	10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 1.09% (0.91 - 1.27)
<u>Deger L</u> , et al	<u>Can Respir J</u> . 2012 Mar-Apr;19(2):97-102	Asma, en niños	PR 1.14 ( 0.94 to 1.39)
<u>Sousa SI</u> , et al	<u>EnvironInt</u> . 2012 Aug;43:1-5	Atenciones de urgencia, mayores de 65 años	2% por 10 µg m <sup>-3</sup> en SO
<u>Turin TC</u> , et al	<u>Neuroepidemiology</u> . 2012;38(2):84-92	Accidente Vascular Encefálico Hemorrágico	Se encontró asociación
<u>Chang YK</u> , et al	<u>Chemosphere</u> . 2012 Mar;87(1):26-30	Función Pulmonar: FVC FEV <sub>1</sub>	1 ppb de SO <sub>2</sub> 12.9 mL (-20.7, -5.09 mL) 11.7 mL ( -19.3, -4.16 mL),
<u>Yeh KW</u> , <u>Chang CJ</u> , <u>Huang JL</u> .	<u>Asian Pac J Allergy Immunol</u> . 2011 Mar;29(1):34-41	Asma en niños	Se encontró asociación
<u>Wiwatanadate P</u> , <u>Liwsrisakun C</u> .	<u>Int J Hyg Environ Health</u> . 2011 Jun;214(3):251-7	Síntomas en asmáticos	Coefficiente de correlación 0.47 ( 0.00-0.94)
Tramuto F, et al	<u>Environ Health</u> . 2011 Apr 13;10:31	Atenciones de urgencia por morbilidad respiratoria	OR = 1.068, 95% CI: 1.014 - 1.126
<u>Hwang BF</u> , <u>Lee YL</u> , <u>Jaakkola JJ</u> .	<u>Environ Health Perspect</u> . 2011 Sep;119(9):1345-9	Abortos	OR = 1.02 (1.00-1.04)
Kan H, et al	<u>Res Rep Health Eff Inst</u> . 2010 Nov;(154):17-78.	Mortalidad	0.95% (95% CI, 0.62-1.28)
Zhao , <u>Liang Z</u> , <u>Tao S</u> , <u>Zhu J</u> , <u>Du Y</u> .	<u>Environ Health</u> . 2011 Jan 10;10:2	Parto Prematuro	RR: 1.0388 ( 1.0096-1.0681)
<u>Zhang YS</u> , <u>Zhou MG</u> , <u>Jia YP</u> , <u>Hu YS</u> , <u>Zhang JL</u> , <u>Jiang GH</u> , <u>Pan XC</u> .	<u>Zhonghua Liu Xing Bing XueZaZhi</u> . 2010 Oct;31(10):1158-62	Mortalidad no accidental Mortalidad cardiovascular	Por 10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 0.56% (0.23% - 0.89%) 0.49% (0.06% - 0.93%)
<u>Darrow LA</u> , <u>Klein M</u> , <u>Strickland MJ</u> , <u>Mulholland JA</u> , <u>Tolbert PE</u> .	<u>Environ Health Perspect</u> . 2011 May;119(5):731-7	Peso de nacimiento	-3.9 g** (-7.5 to -0.4)
<u>Vrijheid M</u> , <u>Martinez D</u> , <u>Manzanares S</u> , <u>Dadvand P</u> , <u>Schembari A</u> , <u>Rankin J</u> , <u>Nieuwenhuijsen M</u> .	<u>Environ Health Perspect</u> . 2011 May;119(5):598-606	Tetralogía de Fallot Defecto de tabique auricular	1 ppb SO <sub>2</sub> = 1.07(1.01-1.13) 1 ppb SO <sub>2</sub> = 1.03( 1.01-1.05)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
Linares B, Guizar JM, Amador N, Garcia A, Miranda V, Perez JR, Chapela R.	BMC PulmMed. 2010 Nov 24;10:62	Infecciones Respiratorias Agudas	1.0521 (1.0254,1.0794)
Menichini F, Mudu P.	Pha.I Drug Saf. 2010 Dec;19(12):1300-15	Consumo de medicamentos	RR=1.005 (1.001-1.010) lag 9
Guo Y, Tong S, Li S, Barnett AG, Yu W, Zhang Y, Pan X.	Environ Health. 2010 Oct 5;9:5	Consultas por Hipertension	OR: 1.025 ( 0.987-1.065)
Pan G, Zhang S, Feng Y, Takahashi K, Kagawa J, Yu L, Wang P, Liu M, Liu Q, Hou S, Pan B, Li J.	Respir Med. 2010 Dec;104(12):1903-11	Tos persistente Flema persistente Asma	1.24( 1.13-1.36) 1.21( 1.06- 1.38) 1.52(1.21- 1.92)
Kaplan GG, et al	Am J Gastroenterol. 2010 Nov;105(11):2412-9	Colitis Ulcerosa, menores de 25 años	OR=2.00(1.08-3.72)
He QQ, Wong TW, Du L, Jiang ZQ, Gao Y, Qiu H, Liu WJ, Wu JG, Wong A, Yu TS.	RespirMed. 2010 Oct;104(10):1512-20	Función respiratoria en niños	Se encontró asociación
Ye Y, Li XY, Chen K, Liu QM, Xiang HQ.	Zhonghua Liu Xing Bing XueZaZhi. 2009 Aug;30(8):816-9	Accidente Vascular Hemorrágico	10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> OR: 1.119 (1.019 - 1.229)
López-Villarrubia E, Ballester F, Iñiguez C, Peral N.	EnvironHealth. 2010 Feb 12;9:8	Mortalidad diaria	10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 2.0% (0.17 - 3.84)
Bentayeb M, Helmer C, Raheison C, Dartigues JF, Tessier JF, Annesi-Maesano I.	Respir Med. 2010 Jun;104(6):880-8.	Adultos mayores, síntomas respiratorios  Tos Flema	Concentraciones anuales de 23.1 [19; 51]µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> OR: 1.55 (1.16-2.08) OR: 1.45 (1.04-2.01)
Clark NA, Demers PA, Karr CJ, Koehoorn M, Lencar C, Tamburic L, Brauer M.	Environ Health Perspect. 2010 Feb;118(2):284-90	Asma Exposición intra – uterina Exposición primer año de vida	1 µg/m <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> OR: 1.03 (1.02–1.05) OR: 1.03 (1.02–1.05)
Kan H, Wong CM, Vichit-Vadakan N, Qian Z; PAPA Project Teams.	Environ Res. 2010 Apr;110(3):258-64	Mortalidad Total Mortalidad Cardiovascular Mortalidad Respiratoria	10 µg/m <sup>3</sup> de promedio móvil de 2días 1.00% (0.75-1.24) 1.09% ( 0.71-1.47) 1.47% ( 0.85-2.08)
Dales RE, Cakmak S, Vidal CB.	J ThrombHaemost. 2010 Apr;8(4):669-7	Hospitalizaciones por Enfermedad Tromboembólica, Chile	Para 5.85 p.p.b. de SO <sub>2</sub> 1.08 (1.03, 1.12)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
Pénard-Morand C, Raheison C, Charpin D, Kopferschmitt C, Lavaud F, Caillaud D, Annesi-Maesano I.	EurRespir J. 2010 Jul;36(1):33-40	Niños urbanos Asma inducida por ejercicio Asma en el último año Asma crónica	Para 5µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> OR: 1.27(1.11-1.53) OR: 1.29(1.03-1.71) OR: 1.26(1.11-1.42)
Wiwatanadate P, Trakultivakorn M.	InhalToxicol. 2010 Mar;22(4):301-8	Flujo espiratorio en niños asmáticos	-2.12 ( -3.22 to -0.28)
Orazzo F, et al	Environ Health Perspect. 2009 Nov;117(11):1780-5	Sibilancias en niños	Par 8.0-microg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 3.4% (1.5-5.3)
Szyszkowicz M, Kaplan GG, Grafstein E, Rowe BH.	Int J Occup Med Environ Health. 2009;22(3):235-42	Consultas urgencia por Migraña y Cefalea	Para 4.6 ppb de SO <sub>2</sub> 4.0% ( 0.8-7.3)
Kaplan GG, et al	CMAJ. 2009 Oct 27;181(9):591-7	Apendicitis	OR 1.30( 1.03-1.63)
Dales RE, Cakmak S, Vidal CB.	Am J Epidemiol. 2009 Oct 15;170(8):1057-66	Hospitalizaciones por cefalea en Chile	6.20-ppb de SO <sub>2</sub> 1.10 ( 1.04, 1.17)
Szyszkowicz M, Stieb DM, Rowe BH.	Am J Emerg Med. 2009 May;27(4):391-6	Consultas por migraña	2.3-ppb de SO <sub>2</sub> 2.5% ( 0.3-4.6)
Arbex MA, de Souza Conceição GM, Cendon SP, Arbex FF, Lopes AC, Moysés EP, Santiago SL, Saldiva PH, Pereira LA, Braga AL.	J Epidemiol Community Health. 2009 Oct;63(10):777-83	Consultas urgencias respiratorias	Para 7.8 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 16%
Wang XY, Hu W, Tong S.	Geospat Health. 2009 May;3(2):257-63	Mortalidad Cardio Respiratoria	1 ppb promedio anual de SO <sub>2</sub> 4.7% (0.7-8.9)
Liu L, Poon R, Chen L, Frescura AM, Montuschi P, Ciabattini G, Wheeler A, Dales R.	Environ Health Perspect. 2009 Apr;117(4):668-74	Disminución VEF <sub>25-75</sub> Stress oxidativo	5.4 ppb de SO <sub>2</sub> -3.1% (-5.8 to -0.3) 36.2% 15.7 to 57.2)
Leitte AM, Petrescu C, Franck U, Richter M, Suciú O, Ionovici R, Herbarth O, Schlink U.	Sci Total Environ. 2009 Jun 15;407(13):4004-1	Salud Respiratoria	10 µg/m <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> 6% (7%-25%)
Szyszkowicz M, Rowe BH, Kaplan GG.	Int J Occup Med Environ Health. 2009;22(1):7-12	Migraña	16.8% (1.2-34.8) para promedio de 4 días ( de concentraciones media) de SO <sub>2</sub> , (IQR) aumento de 1.9 ppb
Moon JS, Kim YS, Kim JH, Son BS, Kim DS, Yang W.	Int J Environ Health Res. 2009 Feb;19(1):31-48	Síntomas respiratorios en escolares	Correlación positiva con síntomas respiratorios altos
Son JY1, Cho YS, Lee JT.	Arch Environ Occup Health. 2008 Fall;63(3):108-13	Mortalidad Infantil Post Neonatal	1.029 (0.833-1.271)
Hu W, Mengersen K, McMichael A, Tong S.	Int J Biometeorol. 2008 Sep;52(7):689-96	Mortalidad	Se encontró asociación positiva
Laurent O, et al	Am J Epidemiol. 2008 Jul 1;168(1):58-65	Crisis de asma	OR = 1.056( 0.979- 1.139)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
Ion-Nedelcu N, Nițescu M, Caián M, Bacruban R, Ceașu E.	Bacteriol Viruso Parazito Epidemiol. 2008 Apr-Jun;53(2):117-20	Consultas por IRA bajas	Correlación positiva
Hansen CA, Barnett AG, Pritchard G.	Environ Health Perspect. 2008 Mar;116(3):362-9	Circunferencia abdominal a la ecografía	SO <sub>2</sub> durante día 61-90 -1.67 mm; (-2.94 to -0.40)
Min KB, Min JY, Cho SI, Paek D.	InhalToxicol. 2008 Feb;20(4):435-44	Signos cardiacos	Se encontró asociación
Szyszkowicz M.	Headache. 2008 Jul;48(7):1076-81	Cefalea	4.2% (0.2, 6.4) y 4.9% ( 1.2, 8.8) para lag 1y 2 SO <sub>2</sub> un aumento en IQR, ( IQR = 3.9 ppb)
Min JY, Min KB, Cho SI, Paek D.	J Toxicol Environ Health A. 2008;71(5):301-3	Función pulmonar, fumadores	Efecto combinado
Szyszkowicz M	Int J Occup Med Environ Health. 2007;20(3):241-5	Consultas Urgencia por Depresión	4.5% (0.1, 9.1) para SO <sub>2</sub> solo en mujeres durante la estación cálida
Migliaretti G, Dalmaso P, Gregori D.	Int J Environ Health Res. 2007 Oct;17(5):369-79.	Consultas de urgencia respiratorias	10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> 2.20% ( 1.70 - 2.60)
Shima M	J Epidemiol. 2007 Sep;17(5):169-76.	Aumento en Proteína C Reactiva, en niños	OR =1.45 ( 1.04-2.03)
Elliott P, Shaddick G, Wakefield JC, de Hoogh C, Briggs DJ.	Thorax. 2007 Dec;62(12):1088-94. Epub 2007 Jul 31.	Mortalidad respiratoria	por 10 ppb SO <sub>2</sub> 13.2% (11.5-14.9) (1982-98) 21.7(2.9 - 38.5) (1994-98)
Hajat S, Armstrong B, Wilkinson P, Busby A, Dolk H.	J Epidemiol Community Health. 2007 Aug;61(8):719-22	Mortalidad infantil	10 µg/m <sup>3</sup> de aumento RR: 1.02 ( 1.01 - 1.04)
Cakmak S, Dales RE, Vidal CB.	Environ Health Perspect. 2007 Apr;115(4):524-7	Mortalidad no accidental, Chile <65 años >85 años	14.08 ppb SO <sub>2</sub> 4.77% 7.92%
Choi JH, Xu QS, Park SY, Kim JH, Hwang SS, Lee KH, Lee HJ, Hong YC.	J Epidemiol Community Health. 2007 Apr;61(4):314-8.	Presión arterial	Se detecta asociación
Dales RE1, Cakmak S, Doiron MS.	Environ Health Perspect. 2006 Nov;11(11):1751-4.	Hospitalizaciones neonatales Modelo a un contaminante Modelo multicontaminante Modelo con sólo días con mediciones de MP	SO <sub>2</sub> (ppb) 3.8 2.06% (1.04 to 3.08) * 1.66% (0.63 to 2.69) 1.41% (0.35 to 2.47)
Yang CY, Hsieh HJ, Tsai SS, Wu TN, Chiu HF.	J Toxicol Environ Health A. 2006 Nov;69(22):2033-40.	Mortalidad Postneonatal	4.1%
Rich DQ, Kim MH, Turner JR, Mittleman MA, Schwartz J, Catalano PJ, Dockery DW.	Occup Environ Med. 2006 Sep;63(9):591-6. Epub 2006 May 12	Arritmias ventricular	5 ppb de SO <sub>2</sub> 24%, (7% to 44%)

<b>Autores</b>	<b>Revista, fecha publicación</b>	<b>Tipo de efecto estudiado</b>	<b>Función dosis/respuesta para SO<sub>2</sub></b>
Ballester F, et al	J Epidemiol Community Health. 2006 Apr;60(4):328-36	Hospitalizaciones cardiovasculares Todas las cardiovasculares Corazón	Para a 10 mg/m <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> 1.33%(0.21- 2.46) 1.72%( 0.50 2.95)
Low RB, Bielory L, Qureshi AI, Dunn V, Stuhlmiller DF, Dickey DA.	Stroke. 2006 Apr;37(4):951-7	Hospitalizaciones por Accidente Vascular Encefálico	P=0.0471
Dugandzic R, Dodds L, Stieb D, Smith-Doiron M.	Environ Health. 2006 Feb 17;5:3	Bajo peso de nacimiento	RR: 1.36 (1.04 - 1.78)
Lee BE, Ha EH, Park HS, Kim H, Lee HJ, Lee YK, Lee SJ, Hong YC.	Prev Med Public Health. 2005 Nov;38(4):465-72.	Síntomas respiratorios en escolares	OR:1.12 (1.01-1.25)
Pénard-Morand C1, Charpin D, Raheison C, Kopferschmitt C, Caillaud D, Lavaud F, Annesi-Maesano I.	ClinExp Allergy. 2005 Oct;35(10):1279-87.	Salud respiratoria en escolares	aumento de 5 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> ORa 1.39 (1.15-1.66)
Ruidavets JB, Cassadou S, Cournot M, Bataille V, Meybeck M, Ferrières J.	J Epidemiol Community Health. 2005 Aug;59(8):685-93.	Taquicardia	OR 1.16 (0.94 to 1.44) in Q5 compared with Q1, p for trend = 0.05
Gilboa SM, Mendola P, Olshan AF, Langlois PH, Savitz DA, Loomis D, Herring AH, Fixler DE.	Am J Epidemiol. 2005 Aug 1;162(3):238-52. Epub 2005 Jun 29.	Malformaciones congénitas: Defectos Septales	OR = 2.16( 1.51- 3.09)
Sagiv SK, Mendola P, Loomis D, Herring AH, Neas LM, Savitz DA, Poole C	Environ Health Perspect. 2005 May;113(5):602-6	Parto Prematuro	Para 15 ppb de SO <sub>2</sub> OR: 1.15(1.00-1.32)
Kan HD, Chen BH, Fu CW, Yu SZ, Mu LN.	Biomed Environ Sci. 2005 Feb;18(1):1-4.	Mortalidad por SARS	10 µg/m <sup>3</sup> de SO <sub>2</sub> RR:0.74 (0.48-1.13) No significativo
Luginaah IN, Fung KY, Gorey KM, Webster G, Wills C.	Environ Health Perspect. 2005 Mar;113(3):290-6	Hospitalizaciones respiratorias, en mujeres 0-14 años	19.95 ppb de SO <sub>2</sub> RR 1.11(1.01-1.22)
Fung KY1, Luginaah I, Gorey KM, Webster G.	Can J Public Health. 2005 Jan-Feb;96(1):29-33	Hospitalizaciones cardiovasculares	2.6% for current day sulphur dioxide level (0.5-6.4), 4.0% for 2-day mean level (0.1-6.9), and 5.6% (1.5-9.9) for 3-day mean level for an increase in interquartile range of 19.3 ppb.
Wilson AM1, Wake CP, Kelly T, Salloway JC.	Environ Res. 2005 Mar;97(3):312-21.	Consultas de emergencia	IQR increase in SO <sub>2</sub> was associated with a 5% (2-7%) increase in all respiratory ER visits and a 6% (1-12%) increase in asthma visits
Wilson AM1, Salloway JC, Wake CP, Kelly T.	Environ Int. 2004 Oct;30(8):1109-18	Uso de servicios médicos	Asociación general

Autores	Revista, fecha publicación	Tipo de efecto estudiado	Función dosis/respuesta para SO <sub>2</sub>
Aunan K1, Pan XC.	Sci Total Environ. 2004 Aug 15;329(1-3):3-1	Funciones dosis/respuesta China Todas las causas de muerte Muertes cardiovasculares Muertes respiratorias Hospitalizaciones cardiovasculares Hospitalizaciones respiratorias	Por µg/m <sup>3</sup> SO <sub>2</sub> 0.04% (S.E. 0.01) 0.04% (S.E. 0.01) 0.10% (S.E. 0.02) 0.19% (S.E. 0.03) 0.15% (S.E. 0.03)

Acrónimos usados:

bpm: latido por minute \*\*gramos  
 HR= Hazard Ratio o Razón de Riesgo  
 RR= Relative Risk o Riesgo relativo  
 OR= Odds Ratio o razón de chances  
 OR<sub>a</sub> = Odds Ratio ajustado  
 IQR= Rango Intercuartílico

### 3.1.5. Discusión

La mayoría de los antecedentes, tanto toxicológicos como epidemiológicos, recogidos a nivel internacional y en el país muestran en forma consistente que la exposición a SO<sub>2</sub> atmosférico representa un peligro para la salud pública.

Esto debido a los efectos dañinos causales que produce principalmente en la función respiratoria. Es así como exposiciones a cortos períodos de duración producen efectos sobre la población más sensible que son los portadores de asma bronquial. Sin embargo niveles más elevados de contaminación por este gas también han mostrado efectos sobre población general.

Los efectos sobre la salud se refieren a enfermedades que provocan consultas en los servicios de urgencia y hospitalizaciones, especialmente exacerbaciones de cuadros asmáticos.

Estos resultados llevaron en el año 2005 a la Organización Mundial de la Salud a establecer nuevas guías para el contaminante, y en particular fijar un nivel horario además de ajustar el nivel para promedio diario. Estados Unidos en su revisión del 2010, también establece una norma horaria para dar cuenta de los efectos agudos que provoca el contaminante.

La revisión de publicaciones científicas más modernas a las contempladas en las revisiones de la OMS y de la EPA, confirman los efectos respiratorios y amplían el rango de daños a la salud relacionados con la exposición al SO<sub>2</sub>.

Además de los efectos respiratorios, se han descrito resultados que asocian la exposición a este contaminante con muertes prematuras, tanto a nivel nacional como internacional y efectos cardío-vasculares. También se han publicado varios estudios que muestran los efectos crónicos de la exposición al SO<sub>2</sub> sobre patología respiratoria crónica y malformaciones congénitas. Por lo que no se puede mantener el planteamiento de que el dióxido de azufre solo produce efectos agudos sobre la salud de la población.

## 3.2. Toxicología

### 3.2.1. Efectos del SO<sub>2</sub> en humanos

El SO<sub>2</sub> es considerado un irritante primario y puede tener efectos severos en la salud, tanto de corto como de largo plazo. Debido a que el SO<sub>2</sub> es gaseoso en condiciones normales, el principal blanco para la exposición y acción tóxica es el sistema

respiratorio. Sin embargo los ojos y la piel también pueden ser sujetos de los efectos irritantes resultado del contacto directo y alta solubilidad en agua.

Los asmáticos pueden ser sensibles a los cambios en efectos respiratorios debido a exposición al  $\text{SO}_2$  aun a bajas concentraciones. La sensibilidad especial al  $\text{SO}_2$  es usada para la inducción intencional de ataques asmáticos con fines experimentales o terapéuticos.

### Metabolismo: Absorción, distribución y excreción

**Absorción:** La mayoría de los estudios en humanos y animales muestran que de un 40 a más del 90% del  $\text{SO}_2$  inhalado es absorbido en el tracto respiratorio superior, aunque la absorción es baja a concentraciones bajas. El  $\text{SO}_2$  también puede ingresar por dilución en la saliva, y entrar al sistema gastrointestinal. Ciertos estudios indican absorción por la piel. Cantidades significativas de  $\text{SO}_2$  pueden ser retenidas en los pulmones y tráquea por una semana o más.

La penetración del  $\text{SO}_2$  a los pulmones es mayor durante la respiración por la boca que por las narices. Dos factores que afectan la eficiencia de la absorción son el modo de respiración (bucal vs buconasal) y la intensidad de la respiración. La nariz filtra la mayor parte del  $\text{SO}_2$ , previniendo su pasaje a los receptores sensibles a la irritación en y bajo la laringe. En reposo, la mayoría de la gente (alrededor del 85%) respira por la nariz, resultando en una protección contra la toxicidad del  $\text{SO}_2$ . Respiración por la boca, particularmente con alta intensidad, aumenta sustancialmente la fracción de  $\text{SO}_2$  que alcanza los pulmones. Una hiperventilación voluntaria o ejercicio esforzado requiere respiración buconasal que disminuye el umbral para síntomas respiratorios inducidos por el  $\text{SO}_2$  y sensibilidad broncomotor. La penetración profunda pulmonar y la toxicidad son aumentadas por oxidación y adsorción a submicropartículas ácidas.

En las húmedas membranas mucosas, el  $\text{SO}_2$  es rápidamente hidratado a ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ). Este ácido sulfuroso se disocia fácilmente en iones sulfito ( $\text{SO}_3^-$ ) y bisulfito ( $\text{HSO}_3^-$ ). Los iones bisulfito son entonces rápidamente convertidos en sulfato, mientras el bisulfito se une a proteínas plasmáticas y celulares para formar S-sulfonatos

**Distribución:** Debido a su alta solubilidad, el  $\text{SO}_2$  es rápidamente distribuido por el organismo. Una vez en el torrente sanguíneo, se distribuye por todo el organismo aparentemente ligado a proteínas séricas como S-sulfonato, es metabolizado, y excretado por las vías urinarias. El S-sulfonato se ha encontrado en niveles elevados en el plasma y aorta. La distribución se concentra en el hígado, bazo, esófago, y riñones. La presencia de bisulfito en la sangre puede ser responsable por la inducción de la broncoconstricción asociada con exposición al  $\text{SO}_2$  (y sulfito en alimentos). Al alterar los enlaces disulfuro de las proteínas tisulares, el bisulfito puede llevar a una alteración de receptores neurotransmisores y la contracción subsecuente del tejido de los músculos en los pulmones.

Parte del  $\text{SO}_2$  inhalado es exhalado antes que el cuerpo lo absorba. Otra parte es transformada por conversión en ácido sulfuroso. Los iones bisulfito reaccionan por

sulfonación o auto oxidación con moléculas tales como proteínas conteniendo cisteína y DNA, para formar S-sulfonatos. La formación de sulfonatos prolonga la presencia del  $\text{SO}_2$  en el organismo. Por otra parte los iones sulfito son rápidamente metabolizados a sulfato por la sulfito oxidasa, una enzima con baja actividad en tejido pulmonar. El sulfato se incorpora al pool endógeno de sulfato en el organismo.

**Excreción:** El  $\text{SO}_2$  es excretado como una variedad de compuestos conteniendo azufre y excretados principalmente por la orina en forma de sulfato. Los S-sulfonatos circulantes se descomponen lentamente a  $\text{SO}_2$  o sulfatos. El  $\text{SO}_2$  es exhalado en tanto los sulfatos pasan a formar parte del pool endógeno del sulfato. Estos sulfatos son lentamente eliminados desde la sangre a la orina.

### Toxicidad de corto plazo al $\text{SO}_2$

Exposición de corto plazo a concentraciones muy bajas de  $\text{SO}_2$  causa una sensación de ardor en la nariz y garganta. Además provoca una dificultad para respirar, incluyendo cambios en la habilidad del organismo para tomar un respiro, respirar profundamente, o respirar un mayor volumen de aire por bocanada. Existe abundante evidencia acerca de la toxicidad de corto plazo del  $\text{SO}_2$  en humanos, además de evidencia de estudios llevados a cabo en animales de laboratorio.

El  $\text{SO}_2$  se disuelve en la humedad en la piel, ojos, y membranas mucosas para formar ácido sulfuroso ( $\text{H}_2\text{SO}_3$ ), un irritante e inhibidor del transporte mucociliar. La mayoría del  $\text{SO}_2$  inhalado es detoxificado por el hígado en forma de sulfatos y luego excretado en la orina. El ión bisulfito es muy probable que sea el principal iniciador de la broncoconstricción inducida por el  $\text{SO}_2$ .

A dosis suficientemente altas (por sobre 400 ppm o  $1048180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la toxicidad aguda puede ser fatal. Excepto en casos de sensibilidad especial, para que ocurran efectos significativos en la salud la concentración debe ser relativamente alta, normalmente por encima del umbral de olor y muy por encima de los estándares de exposición para obreros regularmente expuestos.

Una exposición al  $\text{SO}_2$  puede afectar múltiple sistemas del organismo. En ratón de laboratorio, exposición a  $\text{SO}_2$  inhalado por 6 horas por día por 7 días causa daño oxidativo al cerebro, pulmón, corazón, hígado, estómago, intestino, bazo, riñones y testículos.

### Respiración

La mayoría de las exposiciones se deben a contaminación aérea, lo cual tiene consecuencias de corto y largo plazo en la salud para personas con enfermedades pulmonares.

La inhalación es la ruta principal de exposición al  $\text{SO}_2$ , produciendo irritación del tracto respiratorio superior. La irritación respiratoria induce síntomas tales como estornudo, garganta áspera, jadeo con silbido, respiración corta, estrechez del pecho, y una sensación de sofoco. El reflejo laríngeo con espasmo y edema pueden causar obstrucción aguda de las vías aéreas. Puede ocurrir broncoespasmo, neumonitis, y edema pulmonar. Los efectos agudos de una exposición incluyen rinorrea (descargas de la mucosa nasal), sofocamiento, expectoración, sangrado de nariz, dificultad para tragar, eritema orofaríngeo (enrojecimiento inflamatorio de la cavidad faríngea y oral), y tos. Después de una inhalación a dosis moderadas a altas de  $\text{SO}_2$  también se presentan náuseas, vómitos y dolor abdominal.

Dentro de los 5 a 10 minutos desde el comienzo de la exposición, las víctimas desarrollan reflejo de bronco constricción temporal y aumento de la resistencia de los pasajes aéreos. Una exposición continua puede resultar en ronquido de tono alto, dolor torácico, naso faringitis, traqueítis, edema laríngeo, bronconeumonía química, edema pulmonar, cianosis, asfixia y muerte. Destrucción del epitelio ciliado también lleva a aumento de riesgos de infecciones pulmonares. La forma más común de muerte es por asfixia por constricción de la glotis y de los bronquios, de manera que es imperativa una protección inmediata de las vías respiratorias en toda víctima que presente síntomas pulmonares.

Algunos individuos son muy susceptibles a la presencia de  $\text{SO}_2$  y sobre reaccionan a concentraciones que, para la mayoría de la gente, solo tienen una respuesta mucho menor. Esta respuesta hiperreactiva ocurre la primera vez que el individuo es expuesto y por lo tanto no es una respuesta inmuno-adquirida o hipersensible.

La climatización, esto es, el ajuste fisiológico del individuo a los cambios ambientales, puede también ocurrir en hasta un 80% de los individuos expuestos. Esto no es necesariamente beneficioso aunque la exposición puede llegar a ser menos subjetivamente objetable con una exposición objetable y continua o repetida.

El  $\text{SO}_2$  junto a otros compuestos en la contaminación aérea, pueden exacerbar la enfermedad cardiopulmonar crónica. La exposición a altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  pueden resultar en un RADS, un tipo de asma que es inducida por sustancias químicas o irritantes. Los niños pueden ser más vulnerables que los adultos debido al diámetro relativamente menor de los pasajes aéreos, y al relativo mayor ventilación minuto por kg de peso.

En áreas con alta concentración de  $\text{SO}_2$  aéreo, tales como refinerías, plantas petroquímicas y de generación de energía termoeléctricas, se ha observado un marcado aumento en la incidencia de asma, enfisema, bronquitis, y otras enfermedades respiratorias.

Existe suficiente evidencia para inferir una relación causal entre morbilidad respiratoria y la exposición a corto plazo (de 5 minutos a 24 horas) a  $\text{SO}_2$ .

## Ingestión

Ingestión de SO<sub>2</sub> es improbable ya que es un gas a temperatura ambiente. Sin embargo el SO<sub>2</sub> se usa en pequeñas cantidades como preservativo en ciertos alimentos y vino. Individuos asmáticos altamente sensibles al sulfito en alimentos pueden desarrollar broncoespasmos después de ingerir estos alimentos o beber vinos preservados con SO<sub>2</sub> u otros compuestos sulfurados.

## Ocular

Exposición a 10 a 20 ppm (26200 a 52410 µg/m<sup>3</sup>) causa irritación a las membranas mucosas. Conjuntivitis y quemaduras córneas pueden resultar del efecto irritante del vapor de dióxido de azufre o el escape de gas comprimido y de la exposición directa al líquido.

## Dermal

Exposición al aire con 10 a 20 ppm (26200 a 52410 µg/m<sup>3</sup>) de SO<sub>2</sub> causa irritación a membrana mucosa. Contacto directo con escapes de SO<sub>2</sub> gaseoso comprimido o líquido puede producir daño severo a la córnea o quemaduras por congelamiento de la piel. El SO<sub>2</sub> es un irritante severo que causa dolor, enrojecimiento, y ampollas, especialmente en membranas mucosas. En las concentraciones en que normalmente se encuentra en el aire, no tiene efecto en la piel.

## Integración de morbilidad respiratoria y exposición

La relación causal entre la morbilidad respiratoria y la exposición a corto plazo de SO<sub>2</sub> se basa en gran parte en los resultados de estudios controlados de exposición humana con asmáticos haciendo ejercicio. Estos estudios muestran que los individuos asmáticos expuestos a concentraciones de SO<sub>2</sub> tan bajas como 200-300 ppb (520-790 µg/m<sup>3</sup>) durante 5-10 minutos muestran una broncoconstricción moderada o mayor, medida como una disminución en FEV<sub>1</sub><sup>36</sup> ≥ 15% o un aumento de la sRaw<sup>37</sup> ≥ 100% después de una corrección por respuestas inducidas por el ejercicio en aire limpio. Entre los asmáticos, tanto el porcentaje de individuos afectados como la severidad de la respuesta aumentan con el aumento de las concentraciones de SO<sub>2</sub>. En general, se observa asociaciones positivas entre las concentraciones de SO<sub>2</sub> ambiente y síntomas respiratorios, así como visitas ED y las hospitalizaciones por todas las causas respiratorias (particularmente entre los niños y los adultos mayores) y asma.

El efecto del SO<sub>2</sub> parece ser independiente de la presencia simultánea de otros contaminantes gaseosos, incluyendo NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, pero con respecto a PM<sub>10</sub>, la evidencia de un efecto de SO<sub>2</sub> independiente sobre la salud respiratoria es menos consistente.

<sup>36</sup> Volumen espiratorio forzado en 1 segundo

<sup>37</sup> resistencia específica de las vías respiratorias (del inglés *specific airway resistance*)

Hay diferencias en los tiempos promedio asociados con efectos respiratorios en la exposición humana y los estudios epidemiológicos. Es decir, mientras se observan efectos respiratorios adversos siguientes a exposiciones de 5 - 10 minutos en estudios clínicos en humanos, la mayoría de los resultados positivos respiratorias de los estudios epidemiológicos se asocian con un promedio de tiempo de 24 horas. Es posible que estas asociaciones estén determinadas en gran parte por las exposiciones *peak* dentro de un período de 24 horas

Se ha propuesto que tras las exposiciones *peak* de SO<sub>2</sub> en estudios controlados de exposición humana, los efectos respiratorios proporcionan una base para una progresión de morbilidad respiratoria que puede resultar en aumentos de las consultas de urgencias y las hospitalizaciones.

### Efectos del SO<sub>2</sub> en asmáticos

Personas con asma en ejercicio pueden experimentar crisis obstructivas con concentraciones de SO<sub>2</sub> inferiores a 0,1 ppm (790 µg/m<sup>3</sup>). Adultos sanos experimentan resistencia en la respiración a 5 ppm (13100 µg/m<sup>3</sup>), estornudos y tos a 10 ppm (26200 µg/m<sup>3</sup>), y bronco espasmos a 20 ppm (52410 µg/m<sup>3</sup>). Exposición a 50 hasta 100 ppm (131020 hasta 262040 µg/m<sup>3</sup>) puede ser tolerada por más de 30 a 60 minutos, pero exposición más alta o más larga puede llevar a la muerte por obstrucción de las vías respiratorias.

Exposición en niños de corta edad en espacios cerrados y con pobre ventilación o en áreas bajas, puede resultar en asfixia en particular, ya que el SO<sub>2</sub> es más pesado que el aire. Los niños expuestos a los mismos niveles de SO<sub>2</sub> que los adultos, pueden recibir una dosis mayor debido a que tienen una mayor relación superficie pulmonar/peso corporal. Además pueden estar expuestos a niveles mayores debido a la corta estatura, a que los niveles de SO<sub>2</sub> se encuentran más cercanos a la superficie, y a que los niños no abandonan el lugar de la exposición en forma inmediata.

Durante la exposición al SO<sub>2</sub> y poco después, puede comenzar y progresar una inflamación respiratoria aguda y severa obstrucción de las vías respiratorias. En las semanas que siguen a este evento inicial, la función pulmonar medida puede disminuir y aumentar la respuesta inflamatoria. Después de 3 a 12 meses, puede haber tanto una mejora o un alto en la disminución de la función. La función pulmonar original puede no ser recuperada, aunque en muchos casos puede haber una reversibilidad parcial. En estos casos los efectos de largo plazo fueron obstrucción, ya sea por inflamación o constricción bronquial, e hiperreactividad bronquial. Entre asmáticos, una posible consecuencia permanente es una sensibilidad aumentada.

El aumento post-exposición de la SRaw en asmáticos sometidos a diferentes concentraciones de SO<sub>2</sub> por 10 minutos, es proporcional a la concentración del SO<sub>2</sub>. La concentración mediana para una respuesta de aumento del 100% fue 0,75 ppm (1970 µg/m<sup>3</sup>). Hay un aumento significativo en SRaw con concentraciones superiores a 0,5

ppm (1310  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $\text{SO}_2$ , en tanto que 2,0 ppm (5240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $\text{SO}_2$  no afecta los cambios en función pulmonar en sujetos normales.

Los asmáticos son más sensibles que los no-asmáticos a los efectos irritantes del  $\text{SO}_2$ , especialmente cuando hacen ejercicio o al aire frío y seco. Algunos individuos alérgicos o atópicos<sup>38</sup> y personas con RADS también pueden ser más sensibles a la irritación por  $\text{SO}_2$ .

Co-exposiciones a otros irritantes como el ácido sulfúrico, dióxido de nitrógeno y ozono pueden potenciar los efectos irritantes del  $\text{SO}_2$  en la función pulmonar en asmáticos. En los animales, la co-exposición al ozono aumenta la irritación del  $\text{SO}_2$  y aumenta la sensibilidad de las vías respiratorias.

Secuela potencial de la exposición aguda

Exposición aguda por inhalación de alto nivel resulta en fibrosis pulmonar, bronquitis crónica, y bronconeumonía química con bronquiolitis obliterante<sup>39</sup>. En individuos con enfermedad pulmonar subyacente se pueden desatar broncoespasmos, especialmente en aquellos con asma y enfisema. Raramente, el RADS se desarrolla en pacientes sin previo broncoespasmos.

## Otras sustancias con propiedades asmogénicas<sup>40</sup>

### Sulfitos.

Una pequeña cantidad de  $\text{SO}_2$  se produce naturalmente como un producto de fermentación, pero la mayoría del  $\text{SO}_2$  es añadido por el enólogo. Durante la producción del vino blanco, se añade en casi todas las etapas del proceso y se requiere más o menos después de completar la fermentación maloláctica. Se utiliza en menor medida durante la producción de vino tinto, pero sigue siendo un componente necesario en muchas de las técnicas de producción.

El mecanismo más importante de acción para el dióxido de azufre es como agente antimicrobiano. Regula el crecimiento de levaduras dañinas y el crecimiento bacteriano en el vino. Sin embargo, las levaduras "buenas" utilizadas en el proceso de elaboración han desarrollado una resistencia al  $\text{SO}_2$  durante los años, lo que les permite vivir en armonía con los demás. Esto da las levaduras "buenas" como ventaja competitiva sobre las levaduras nocivas en el proceso de fermentación.

Otro papel importante del  $\text{SO}_2$  se encuentra en sus propiedades antioxidantes. Esto protege las cualidades de la fruta - como del vino.  $\text{SO}_2$  puede enlazar con una molécula

<sup>38</sup> Ciertas enfermedades con niveles elevados de IgE asociados a una predisposición genética definida.

<sup>39</sup> Obstrucción de los bronquiolos, especialmente los terminales.

<sup>40</sup> Que producen reacciones similares a los episodios asmáticos agravados

llamada acetaldehído. Muchos de ustedes han experimentado el olor de esta molécula de una manzana marrón, magullada. También se produce cuando un vino sufre oxidación. Cuando el  $\text{SO}_2$  reacciona con acetaldehído, se produce una molécula inofensiva, inodora.

Si un enólogo utiliza demasiada  $\text{SO}_2$ , puede matar la levadura «buena», deteniendo la fermentación antes del punto final deseado. También puede detener la fermentación maloláctica de completar, dando a los vinos un sabor inacabado. Puede decir que un vino tiene demasiado  $\text{SO}_2$  por su olor pungente característico.

Utilizando dióxido de azufre en el vino tinto presenta un conjunto único de problemas para los enólogos.  $\text{SO}_2$  se une a las antocianinas; que dan a los vinos rojos su color. Cuando el  $\text{SO}_2$  reacciona con antocianinas éstas pierden su color y propiedades. Por suerte para los enólogos, un gran porcentaje de las antocianinas están ligadas a moléculas de tanino, que evitan los efectos del  $\text{SO}_2$ .

Cuando una etiqueta dice "contiene sulfitos" se refiere al hecho de que se ha agregado dióxido de azufre. Desde 1987, los vinos vendidos en los Estados Unidos deben tener una etiqueta de advertencia que contienen sulfitos, porque los sulfitos pueden ser perjudiciales para algunas personas en pequeñas cantidades. La UE ha requerido una advertencia similar desde 2005.

En la manufactura del vino el enólogo agrega una cantidad de  $\text{SO}_2$  en forma de sulfitos como agente antimicrobiano y antioxidante para evitar el pardeamiento enzimático. Otra pequeña cantidad de  $\text{SO}_2$  se produce naturalmente como producto de fermentación. Durante la producción del vino blanco, se añade en casi todas las etapas del proceso y se requiere más o menos después de completar la fermentación maloláctica. Se utiliza en menor medida durante la producción de vino tinto, pero sigue siendo un componente necesario en muchas de las técnicas de producción.

Debido a que los sulfitos pueden ser perjudiciales en la salud de algunas personas aun en pequeñas cantidades, las legislaciones de muchos países han incluido una protección para estas personas.

Los límites para el contenido de sulfitos en vinos y licores son:

- En Chile, se consideran *adulterados* si los vinos o licores contienen más de 30 mg/L total de  $\text{SO}_2$ , más de 75 mg/L total de  $\text{SO}_2$  al estado libre, o para los vinos dulces que contengan más de 400 y 100 mg/L, respectivamente (Art. 27 de la ley N°18.455).
- En los EEUU alrededor de 0,4% de la población es altamente alérgico a los sulfitos razón por la cual el gobierno estadounidense requiere un etiquetado que diga "contiene sulfitos" a todo vino que contienen sulfito sobre 10 mg/L. Los

vinos orgánicos deben tener un máximo de 100 mg/L, sin embargo muchos de ellos contienen menos de 50 mg/L.

- En la Comunidad Europea para los vinos tintos, espumantes, blancos y rosé, dulces y licorosos, se establecen contenidos máximos de 150, 185, 260 y 300 mg/L.
- En Australia, para los vinos secos el máximo es de 250 mg/L y 350 mg/L para los vinos con más de 35 mg/L de azúcar residual.
- En Canadá, Japón y Brasil, el límite para cualquier vino es 350 mg/L.

### **Monosodio glutamato.**

El glutamato monosódico (MSG, *monosodium glutamate*) se utiliza para intensificar sabor en ciertos alimentos comestibles. Su consumo puede desarrollar en determinadas personas una reacción asmática conocida como “síndrome del restaurante chino” que es de corto plazo y subjetiva. Sin embargo estos síntomas no tienen un mecanismo de acción conocido, y el papel del MSG no ha sido confirmado.

Exposición a los sulfitos y el glutamato monosódico pueden provocar reacciones de tipo alérgicas.

### **Toxicidad crónica en humanos**

La exposición de largo plazo a SO<sub>2</sub> puede causar cambios en la función pulmonar y agravar enfermedad cardíaca existente. El SO<sub>2</sub> no está clasificado como cancerígeno humano (no ha sido demostrado que cause cáncer en humanos).

La exposición crónica, típicamente asociada con niveles altos de contaminación aérea, ha sido asociada con aumento de morbilidad y mortalidad. Los efectos posibles observados de una exposición de largo plazo o permanente incluyen síndrome de disfunción reactiva de las vías aéreas, daño testicular, tumorigénesis, y posible cocarcinogénesis, i.e., donde el SO<sub>2</sub> actúa como cancerígeno sólo en conjunto con otras sustancias o contaminantes tales como las partículas de los gases de los escapes del diesel, o tal vez benzo[a]pireno.

El SO<sub>2</sub> puede ser irritante a los pulmones, que inflama el tejido pulmonar y agrava enfermedades respiratorias como bronquitis y asma. Como un gas, la principal vía de la toxicidad del dióxido de sulfuro es la inhalación. Sin embargo, también es un fuerte irritante para los ojos y la piel húmeda, donde el gas se combina con agua para formar ácidos sulfúricos y sulfurosos. Las víctimas con enfermedad pulmonar crónica, especialmente asma, han demostrado ser mucho más sensibles al gas en concentraciones más bajas.

Los niños pueden estar en mayor riesgo debido a su mayor superficie pulmonar, al cociente de peso corporal, aumento del volumen minuto, y al cociente de peso y estatura corta.  $\text{SO}_2$  puede ser irritante a los pulmones, lo que inflama el tejido pulmonar y agrava enfermedades respiratorias como bronquitis y asma.

La exposición laboral a  $\text{SO}_2$  puede causar efectos agudos y crónicos, y la exposición a niveles muy altos puede ser potencialmente mortal. Con la exposición aguda a 5 ppm, la víctima se dará cuenta solo por la sequedad de la nariz y la garganta, sin embargo, ya está desarrollando un incremento mensurable en la restricción de las vías respiratorias. A niveles de 6 a 8 ppm ( $15720$  a  $20960 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) hay una disminución mensurable en el volumen tidal. A 10 ppm ( $26200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) hay estornudos, tos, expectoración y los síntomas del ojo, mientras que exposición a 20 ppm ( $52140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) causa graves broncoespasmo. A 50 ppm ( $131020 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), la víctima experimenta síntomas respiratorios superiores extremos, pero no se producirá lesión significativa con exposiciones limitadas a menos de 30 minutos.

En general, la exposición crónica al  $\text{SO}_2$  se asocia con un aumento generalizado de la morbilidad y la mortalidad. Los efectos de la exposición crónica incluyen: sibilancias, disnea leve, tos persistente y flema, hiper respuesta bronquial, enfermedad respiratoria crónica, y los síntomas de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC).

Aumentos de la mortalidad se han asociado con mayores proporciones de ambientales niveles de  $\text{SO}_2$ . La elevada tasa de mortalidad debido a enfermedades respiratorias y pulmonares, junto con las enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares, incluye coronaria y enfermedades isquémicas del corazón y enfermedades ateroscleróticas.

Elevados niveles de  $\text{SO}_2$  también se asocian a un aumento en la mortalidad neonatal, un aumento en la anormalidad de la esperma y una disminución de la fecundidad.

Un estudio muy reciente de recién nacidos con peso encontró un riesgo mayor de 20% de los defectos de nacimiento en las madres que habían sido expuestas a una concentración por sobre 12,4 ppb ( $32,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de  $\text{SO}_2$  en el último trimestre. En animales de laboratorio se observan bajo peso al nacer, defectos músculo esqueléticos y conductuales y fetotoxicidad como consecuencia de la exposición de inhalación. Exposición materna antes de la cópula ha llevado al deterioro de la fertilidad y a trastornos del ciclo menstrual.

### Toxicidad sobre la reproducción

Los efectos del  $\text{SO}_2$  sobre la reproducción en un ambiente ocupacional implican exposiciones mixtas y no son definitivos. El  $\text{SO}_2$  puede ser tóxico al sistema reproductivo de mamíferos después de una exposición intensa pero breve. Se ha observado daño oxidativo a los testículos en ratón de laboratorio expuestos a  $\text{SO}_2$  por 6 horas por día por 7 días, resultando en disminución de los niveles de la superóxido dismutasa (enzima que participa en la conversión del ión superóxido  $\text{O}_2^-$  en peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) y de la glutatión peroxidasa.

Evidencia en ratas de laboratorio indican que el  $\text{SO}_2$  afecta el ciclo estral, aumenta la incidencia de las resorciones fetales y perjudica el desarrollo del feto en concentraciones tan bajas como  $4970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Aunque el  $\text{SO}_2$  no está incluido como sustancia tóxica en la reproducción y desarrollo, un informe de 1991 publicado por la EEUU GAO enumera 30 sustancias químicas de preocupación porque reconoce las consecuencias de la reproducción y el desarrollo. No hay evidencia concluyente que el  $\text{SO}_2$  es un genotóxico en los seres humanos.

### Citotoxicidad

El  $\text{SO}_2$  es tóxico para las células. En la tráquea, altas concentraciones causan descamación epitelial. El crecimiento de las células cultivadas es inhibido por el  $\text{SO}_2$ , y el funcionamiento celular de los macrófagos alveolares es deteriorado por  $\text{SO}_2$ . El ensayo de citotoxicidad encontró una disminución en la producción del factor de necrosis tumoral alfa y citokinas interleukin-1 beta después de exposición a  $\text{SO}_2$ . También daña las células afectando la permeabilidad de la membrana, según el ensayo de citotoxicidad que mide lactosa deshidrogenasa liberada en el medio.

### Genotoxicidad

El  $\text{SO}_2$  inhibe la síntesis de ADN y es clastogénico, es decir, que también causa rotura cromosómica. Estos efectos fueron encontrados en trabajadores de una fábrica de ácido sulfúrico, cuyos linfocitos tenían altas frecuencias de micronúcleos<sup>41</sup>. La exposición al  $\text{SO}_2$  se asocia con una disminución en el índice mitótico y un aumento en la frecuencia de micronúcleos. Dióxido de sulfuro es débilmente mutagénico, con cofactores desconocidos.

### Tumorigénesis y Carcinogénesis

RTECS ha clasificado al  $\text{SO}_2$  como tumorigénico y cocarcinógeno por inhalación en ratón y ratas de laboratorio. Los estudios son contradictorios en cuanto a los efectos cocancerígenos del  $\text{SO}_2$ . Algunos concluyen que aumenta el potencial cocancerígeno de los PAHs y partículas de los escapes del diesel que inducen tumores en los pulmones, mientras otros objetan la sugerencia de que el  $\text{SO}_2$  tenga un efecto potenciador en la carcinogénesis del benzo[a]pireno.

La IARC ha determinado que el  $\text{SO}_2$  no es clasificable en cuanto a su carcinogenicidad para los humanos (IARC Grupo 3), citando evidencia insuficiente y limitada en estudios ya sea en humanos o en animales.

---

<sup>41</sup> Micronúcleos son fragmentos de cromosomas que no están incorporados en el núcleo durante la división celular y se utilizan para evaluar el daño citogenético.

## Mecanismos de acción de la toxicidad por SO<sub>2</sub>

Relativamente poco se sabe acerca de la distribución, metabolismo, y eventual destino de los iones sulfito y bisulfito en la especie humana. Experimentos usando SO<sub>2</sub> marcado, <sup>35</sup>SO<sub>2</sub>, han confirmado que el grueso del SO<sub>2</sub> inhalado es absorbido y distribuido en el organismo. Sin embargo la forma final del azufre es desconocido; muy probablemente es como sulfato, ya que la mayor parte de la radioactividad se excreta como sulfato. De aquí que se postulan que los efectos biológicos del SO<sub>2</sub> están relacionados con el aumento en la formación de sulfatos u óxidos de azufre superiores resultantes de la interacción entre SO<sub>2</sub> y agua o entre SO<sub>2</sub> y material particulado. Sin embargo el diagnóstico de exposición es principalmente clínico, confirmado por la detección del SO<sub>2</sub> en el punto de exposición.

Puesto que el SO<sub>2</sub> se disuelve rápidamente en agua, es intensamente irritante a los ojos y tracto respiratorio. Los efectos predominantes son en el tracto respiratorio superior. El SO<sub>2</sub> es un anhídrido ácido débil que es altamente soluble en solución acuosa, aunque su exacta solubilidad a bajas temperaturas no ha sido determinada. A pH fisiológico, el SO<sub>2</sub> en solución forma mezclas de iones sulfito (SO<sub>3</sub><sup>=</sup>), y bisulfito (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Estos iones se oxidan rápidamente a sulfato (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>), en presencia de la enzima sulfito oxidasa, ampliamente distribuida en el organismo. Por consiguiente, se puede considerar el mecanismo de toxicidad del SO<sub>2</sub> en términos de su acidez débil, de la acción de los iones sulfito-bisulfito, y/o de los efectos de los iones sulfato.

El efecto inmediato del SO<sub>2</sub> en el sistema respiratorio es la broncoconstricción, respuesta que es mediada por receptores quimiosensibles en el árbol traqueobronquial. La activación de estos receptores provoca reflejos del sistema nervioso central que resultan en la broncoconstricción y síntomas respiratorios que son a menudo seguidos de respiración superficial rápida. Los asmáticos son probablemente más sensibles a los efectos respiratorios del SO<sub>2</sub> debido a inflamación asociada con la enfermedad preexistente, que puede llevar a mayor liberación de mediadores inflamatorios o mayor sensibilización de los receptores quimiosensibles. Se concluye que la exposición humana controlada, estudios epidemiológicos y tests toxicológicos apoyan una conclusión de una relación causal entre la morbilidad respiratoria y la exposición a corto plazo (de 5 minutos a 24 horas) a SO<sub>2</sub>.

No hay información acerca de los sitios y velocidad de oxidación del SO<sub>2</sub> a sulfato en los pulmones o sangre periférica. En conejos expuestos a SO<sub>2</sub> se ha detectado presencia de tiosulfonatos (R-SO<sub>2</sub>-S-R, donde R=CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-) en plasma, que persiste por días, pero en humanos las concentraciones son más bajas. Los tiosulfonatos se forman por adición del SO<sub>2</sub> con enlaces disulfuro de las proteínas. Aunque han sido identificados hasta ahora en la sangre, la formación de tiosulfonatos pulmonares puede ser un mecanismo de detoxificación del SO<sub>2</sub>. La actividad de enzimas que contienen enlaces disulfuro integral, tales como la ribonucleasa, pueden estar afectada por esta acción del SO<sub>2</sub>. La rotura de los enlaces disulfuro también parece ser la base de la potenciación *in vitro* de los efectos en la membrana de los eritrocitos de la vía indirecta del

complemento, vía que se discute ser responsable de la liberación de histamina que es inducida por alérgeno-reaginina y que produce ataques asmáticos.

Otro mecanismo bioquímico potencial de la toxicidad por sulfito es la formación de radicales libres. Estas especies químicas reactivas son presumiblemente responsables de un número de efectos del sulfito observados durante incubación *in vitro* con compuestos biológicos, incluyendo nucleótidos piridínicos reducidos, triptófano, metionina, ácido indol-3-acético, vitamina K, y tiamina. Debido a que solo cantidades micromolares de sulfito se necesitan para estas reacciones, es concebible que algunas puedan ocurrir en los pulmones. Las especies exactas de radical-libre responsable de estos efectos no son conocidas y pueden depender de las concentraciones de metales traza y otros componentes interactuantes.

El anión superóxido, hidroxilo, y radical sulfito han sido implicado en varios procesos de enfermedad, incluyendo cáncer y envejecimiento. Sin embargo, por analogía con procesos similares, es posible que la oxidación enzimática del sulfito a sulfato por la sulfito oxidasa ocurre en un medio limitado, por lo tanto previniendo la liberación de radicales libres. Es importante obtener más información acerca de la sulfito oxidasa y el proceso de atrapamiento de los radicales libres en el pulmón.

Se ha demostrado que el sulfito también forma aductos con compuestos de la flavina y con ácido fólico (requiriendo un exceso de sulfito). El sulfito y bisulfito pueden reaccionar con el DNA para producir la deaminación de la citosina. La uridina del RNA también forma un intermediario inestable al reaccionar con iones sulfito-bisulfito. Si bien no se ha demostrado estas reacciones *in vivo*, la reacción con uridina ocurre a concentración menor y a pH normal, de manera que es más probable que tenga un significado toxicológico. Una modificación del RNA se espera que interfiera con la síntesis proteica, lo cual ha sido demostrado después de incubación de bacterias con iones sulfito-bisulfito. Sin embargo incubación de algas con bisulfito parece interferir en la síntesis de DNA, en vez de la síntesis proteica.

Otros efectos de los iones de sulfito-bisulfito observados a altas concentraciones *in vitro* incluyen alteraciones de la función plaquetaria y en la formación del ácido 2,3-difosfoglicérico en glóbulos rojos, un intermediario importante en la regulación del suministro de oxígeno metabólico a los tejidos. Sin embargo, los iones de sulfito libre no se han detectado en la sangre de conejos después de la exposición al dióxido de azufre a 65510  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Hay muchos indicios de que los iones sulfato formados como resultado de la inhalación de dióxido de azufre desempeñan diversos papeles en la toxicidad. El sulfato es normal del cuerpo a constituyente en cantidades suficientes para que los óxidos de azufre ambiente añadieran poco a la concentración total en el cuerpo. Por supuesto, es posible que un aumento local de concentración de sulfato dentro de los pulmones pudiera ser significativo. Esto podría alterar la proporción de sulfatación de mucopolisacáridos, que son componentes importantes del espacio extracelular pulmonar. En este sentido, se observaron concentraciones disminuidas de muco-sustancias sulfatadas mediante técnicas histoquímicas en las superficies bronquiales de perros crónicamente expuestos

a dióxido de azufre en 500-600 ppm (1310220-1572270  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Mediciones bioquímicas adicionales revelaron un aumento en la actividad de glicotransferasa traqueo bronquial. Uno de los pocos estudios para medir los cambios enzimáticos después de la exposición de dióxido de azufre (6 horas/día durante 10 días, 786130  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) detectó el aumento de la actividad de la hidrolasa ácida, pero no de otras enzimas lisosomales en los macrófagos alveolares.

Los receptores para un número de reflejos neuroquímicos parecen ser muy sensibles a cambios en la concentración de iones de hidrógeno, y por lo tanto, es concebible que en el mecanismo principal de dióxido de azufre toxicidad se expresa a través de las respuestas reflejas bronco-constrictivas a una leve disminución en el pH. Asimismo, las concentraciones equivalentes del ácido sulfúrico más fuerte deben ser incluso más probabilidades de producir una respuesta bronco-constrictiva y partículas de sulfato ácido podrían activar las mismas vías.

En resumen, se desconocen los mecanismos bioquímicos mediante el cual las concentraciones de óxidos de azufre ambiente producen efectos en el pulmón. Se acepta que la mayor consecuencia fisiológica de la inhalación de óxido de azufre es broncoconstricción, es concebible que los efectos son totalmente explicables por una disminución en el pH. Hiperplasia de células secretoras de moco, que puede resultar de la exposición prolongada de azufre óxido, también podría ser una respuesta únicamente a la acidez. Sin embargo, este enfoque conservador a una explicación de la toxicidad del óxido de azufre es seguramente una sobre simplificación.

### Condiciones que predisponen la toxicidad del $\text{SO}_2$

**Enfermedad respiratoria preexistente.** El aumento en los síntomas respiratorios y disminución en función pulmonar se observan consistentemente en asmáticos haciendo ejercicio después de 5 a 10 minutos de exposición a  $\text{SO}_2$  a concentraciones que varían entre 400 y 600 ppb. En algunos asmáticos se ha observado una disminución de la función respiratoria a concentraciones de 200-300 ppb. La evidencia clínica y epidemiológica indica que los individuos con enfermedad respiratoria pre-existentes, en particular asma, están a un riesgo mucho mayor de experimentar efectos en la salud debido al  $\text{SO}_2$  que la población general.

**Genética.** Existe consenso científico de que hay un potencial por factores genéticos que aumentan el riesgo de experimentar efectos en la salud asociados con  $\text{SO}_2$  ambiental. Esto requiere una participación de un gen candidato en la patogénesis del efecto de interés, algo que aún no está demostrado. También debe haber un polimorfismo en el gen que resulte en un cambio funcional en la proteína o el nivel de expresión de la proteína.

Aunque numerosos estudios han examinado la asociación entre polimorfismo genético y susceptibilidad a contaminación ambiental en general, sólo *un* estudio ha examinado los efectos de la exposición a  $\text{SO}_2$  en subpoblaciones genéticamente diferentes, y cuyos resultados no son concluyentes.

**Edad.** La evidencia sugiere que los niños (<18 años de edad) y los adultos mayores (>65 años de edad) son los grupos potencialmente a mayor riesgo de experimentar daños en la salud asociados con SO<sub>2</sub>. Se postula que la mayor susceptibilidad en adultos es que estaría relacionada con cambios en las defensas de antioxidantes en los fluidos de las paredes del tracto respiratorio. Los estudios epidemiológicos muestran que el aumento de los síntomas respiratorios en niños está asociado con un aumento de concentraciones de SO<sub>2</sub>.

El aumento en las visitas a servicios de urgencia y hospitalizaciones para todas las causas respiratorias, y en un grado menor con el asma, están asociados con un aumento en 10 ppb en el promedio de SO<sub>2</sub> en 24-horas, que fueron mayores para niños y adultos que para todas las otras edades. Una revisión general de la evidencia concluyó que comparada con la población general, hay poca evidencia para indicar que los niños y adultos están en riesgo mayor de experimentar riesgos en la salud por el SO<sub>2</sub>.

**Tiempo ocupado al exterior de la vivienda.** La gente ocupa más tiempo al exterior de la vivienda, y la concentración de SO<sub>2</sub> es en general más alta al exterior. Por lo tanto, los riesgos en la salud asociados con el SO<sub>2</sub> son función del tiempo ocupado al exterior.

**Intensidad de respiración.** La disminución de la función pulmonar y síntomas respiratorios ocurren en sujetos ejercitando a niveles de exposición de SO<sub>2</sub> significativamente más bajos que en sujetos en descanso. Esto, porque mientras la velocidad de ventilación aumenta, la respiración cambia de nasal a oronasal, resultando en mayor entrada de SO<sub>2</sub> a las vías traqueo bronquiales, debido a la absorción disminuida de SO<sub>2</sub> en los pasajes nasales. Por lo tanto, las personas que ocupan cantidad de tiempo significativas con respiración elevada (mientras juegan, ejercitando, o trabajando) están a mayor riesgo de experimentar efectos en la salud asociados con SO<sub>2</sub>.

**Estado socioeconómico.** Hay limitada evidencia de que un riesgo aumentado por una exposición a SO<sub>2</sub> esté asociado con el estado socio económico.

**Número de individuos en riesgo.** Si se consideran el tamaño de los grupos mencionados más arriba, se puede decir que una gran proporción de la población de diversos países tiene un riesgo relativamente alto de experimentar efectos en la salud asociados con el SO<sub>2</sub>.

En Chile la prevalencia acumulada es de entre 9.7% en niños de 6-7 años y de 7.3 a 12.4% en los de 13-14 años. Las consultas por obstrucción bronquial en atención primaria, constituyen el 23% de todas las atenciones de morbilidad en menores de 15 años, y según datos del Ministerio de Salud general en 16% de todas las consultas en el grupo de 5 a 14 años de edad, lo que ocasiona para el sistema de salud un consumo

significativo de recursos. La prevalencia del asma en Chile ha ido en progresivo descenso desde 1985<sup>42</sup>

**Etnicidad.** En los EE.UU. la prevalencia y severidad del asma es más alta entre ciertos grupos étnicos o raciales tales como Puerto Riqueños, Nativos Americanos, Nativos de Alaska, y Afroamericanos.

**Nivel socioeconómico.** Existe una mayor prevalencia de asma y hospitalizaciones y mayor mortalidad entre personas de más bajo nivel socio económico y minorías.

### Mecanismos de acción de la toxicidad por SO<sub>2</sub>

Relativamente poco se sabe acerca de la distribución, metabolismo, y eventual destino de los iones sulfito y bisulfito en la especie humana. Experimentos usando SO<sub>2</sub> marcado, <sup>35</sup>SO<sub>2</sub>, han confirmado que el grueso del SO<sub>2</sub> inhalado es absorbido y distribuido en el organismo. Sin embargo la forma final del azufre es desconocido; muy probablemente es como sulfato, ya que la mayor parte de la radioactividad se excreta como sulfato. De aquí que se postulan que los efectos biológicos del SO<sub>2</sub> están relacionados con el aumento en la formación de sulfatos u óxidos de azufre superiores resultantes de la interacción entre SO<sub>2</sub> y agua o entre SO<sub>2</sub> y material particulado. Sin embargo el diagnóstico de exposición es principalmente clínico, confirmado por la detección del SO<sub>2</sub> en el punto de exposición.

Puesto que el SO<sub>2</sub> se disuelve rápidamente en agua, es intensamente irritante a los ojos y tracto respiratorio. Los efectos predominantes son en el tracto respiratorio superior. El SO<sub>2</sub> es un anhídrido ácido débil que es altamente soluble en solución acuosa, aunque su exacta solubilidad a bajas temperaturas no ha sido determinada. A pH fisiológico, el SO<sub>2</sub> en solución forma mezclas de iones sulfito (SO<sub>3</sub><sup>=</sup>), y bisulfito (HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Estos iones se oxidan rápidamente a sulfato (SO<sub>4</sub><sup>=</sup>), en presencia de la enzima sulfito oxidasa, ampliamente distribuida en el organismo. Por consiguiente, se puede considerar el mecanismo de toxicidad del SO<sub>2</sub> en términos de su acidez débil, de la acción de los iones sulfito-bisulfito, y/o de los efectos de los iones sulfato.

El efecto inmediato del SO<sub>2</sub> en el sistema respiratorio es la broncoconstricción, respuesta que es mediada por receptores quimio sensibles en el árbol traqueobronquial. La activación de estos receptores provoca reflejos del sistema nervioso central que resultan en la broncoconstricción y síntomas respiratorios que son a menudo seguidos de respiración superficial rápida. Los asmáticos son probablemente más sensibles a los efectos respiratorios del SO<sub>2</sub> debido a inflamación asociada con la enfermedad preexistente, que puede llevar a mayor liberación de mediadores inflamatorios o mayor sensibilización de los receptores quimio sensibles. Se concluye que la exposición humana controlada, estudios epidemiológicos y estudios toxicológicos apoyan una conclusión de una relación causal entre la morbilidad respiratoria y la exposición a corto plazo (de 5 minutos a 24 horas) a SO<sub>2</sub>.

<sup>42</sup> Astudillo, P. Neumología Pediátrica 91-93

No hay información acerca de los sitios y velocidad de oxidación del  $\text{SO}_2$  a sulfato en los pulmones o sangre periférica. En conejos expuestos a  $\text{SO}_2$  se ha detectado presencia de tiosulfonatos ( $\text{R-SO}_2\text{-S-R}$ , donde  $\text{R}=\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{-}$ ) en plasma, que persiste por días, pero en humanos las concentraciones son más bajas. Los tiosulfonatos se forman por adición del  $\text{SO}_2$  con enlaces disulfuro de las proteínas. Aunque han sido identificados hasta ahora en la sangre, la formación de tiosulfonatos pulmonares puede ser un mecanismo de detoxificación del  $\text{SO}_2$ . La actividad de enzimas que contienen enlaces disulfuro integral, tales como la ribonucleasa, pueden estar afectada por esta acción del  $\text{SO}_2$ . La rotura de los enlaces disulfuro también parece ser la base de la potenciación *in vitro* de los efectos en la membrana de los eritrocitos de la vía indirecta del complemento, vía que se discute ser responsable de la liberación de histamina que es inducida por alérgeno-reaginina y que produce ataques asmáticos.

Otro mecanismo bioquímico potencial de la toxicidad por sulfito es la formación de radicales libres. Estas especies químicas reactivas son presumiblemente responsables de un número de efectos del sulfito observados durante incubación *in vitro* con compuestos biológicos, incluyendo nucleótidos piridínicos reducidos, triptófano, metionina, ácido indol-3-acético, vitamina K, y tiamina. Debido a que solo cantidades micromolares de sulfito se necesitan para estas reacciones, es concebible que algunas puedan ocurrir en los pulmones. Las especies exactas de radical-libre responsable de estos efectos no son conocidas y pueden depender de las concentraciones de metales traza y otros componentes interactuantes.

El anión superóxido, hidroxilo, y radical sulfito han sido implicado en varios procesos de enfermedad, incluyendo cáncer y envejecimiento. Sin embargo, por analogía con procesos similares, es posible que la oxidación enzimática del sulfito a sulfato por la sulfito oxidasa ocurre en un medio limitado, por lo tanto previniendo la liberación de radicales libres. Es importante obtener más información acerca de la sulfito oxidasa y el proceso de atrapamiento de los radicales libres en el pulmón.

Se ha demostrado que el sulfito también forma aductos con compuestos de la flavina y con ácido fólico (requiriendo un exceso de sulfito). El sulfito y bisulfito pueden reaccionar con el DNA para producir la deaminación de la citosina. La uridina del RNA también forma un intermediario inestable al reaccionar con iones sulfito-bisulfito. Si bien no se ha demostrado estas reacciones *in vivo*, la reacción con uridina ocurre a concentración menor y a pH normal, de manera que es más probable que tenga un significado toxicológico. Una modificación del RNA se espera que interfiera con la síntesis proteica, lo cual ha sido demostrado después de incubación de bacterias con iones sulfito-bisulfito. Sin embargo incubación de algas con bisulfito parece interferir en la síntesis de DNA, en vez de la síntesis proteica.

Otros efectos de los iones de sulfito-bisulfito observados a altas concentraciones *in vitro* incluyen alteraciones de la función plaquetaria y en la formación del ácido 2,3-difosfoglicérico en glóbulos rojos, un intermediario importante en la regulación del suministro de oxígeno metabólico a los tejidos. Sin embargo, los iones de sulfito libre no

se han detectado en la sangre de conejos después de la exposición al dióxido de azufre a 25 ppm ( $65400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Hay muchos indicios de que los iones sulfato formados como resultado de la inhalación de dióxido de azufre desempeñan diversos papeles en la toxicidad. El sulfato es normal del cuerpo a constituyente en cantidades suficientes para que los óxidos de azufre ambiente añadieran poco a la concentración total en el cuerpo. Por supuesto, es posible que un aumento local de concentración de sulfato dentro de los pulmones pudiera ser significativo. Esto podría alterar la proporción de sulfatación de mucopolisacáridos, que son componentes importantes del espacio extracelular pulmonar. En este sentido, se observaron concentraciones disminuidas de mucosustancias sulfatadas mediante técnicas histoquímicas en las superficies bronquiales de perros crónicamente expuestos a dióxido de azufre en 500-600 ppm. Mediciones bioquímicas adicionales revelaron un aumento en la actividad de glicotransferases traqueobronquial. Uno de los pocos estudios para medir los cambios enzimáticos después de la exposición de dióxido de azufre (6 horas/día durante 10 días, 300 ppm) detectó el aumento de la actividad de la hidrolasa ácida, pero no de otras enzimas lisosomales en los macrófagos alveolares.

Los receptores para un número de reflejos neuroquímicos parecen ser muy sensibles a cambios en la concentración de iones de hidrógeno, y por lo tanto, es concebible que en el mecanismo principal de dióxido de azufre toxicidad se expresa a través de las respuestas reflejas bronco constrictivas a una leve disminución en el pH. Asimismo, las concentraciones equivalentes del ácido sulfúrico más fuerte deben ser incluso más probabilidades de producir una respuesta bronco constrictiva y partículas de sulfato ácido podrían activar las mismas vías.

En resumen, se desconocen los mecanismos bioquímicos mediante el cual las concentraciones de óxidos de azufre ambiente producen efectos en el pulmón. Se acepta que la mayor consecuencia fisiológica de la inhalación de óxido de azufre es broncoconstricción, es concebible que los efectos son totalmente explicables por una disminución en el pH. Hiperplasia de células secretoras de mucosidad, que puede resultar de la exposición prolongada del  $\text{SO}_2$ , también podría ser una respuesta únicamente a la acidez. Sin embargo, este enfoque conservador a una explicación de la toxicidad del óxido de azufre es seguramente una sobresimplificación.

### 3.2.2. Discusión

- La susceptibilidad de un individuo al  $\text{SO}_2$  depende de una multitud de factores que representan fases del desarrollo normal (edad), atributos biológicos (género masculino o femenino), y otros factores tales como estatus socio económico.
- Subpoblaciones pueden ser vulnerables al  $\text{SO}_2$  en respuesta a un aumento en exposición durante una etapa en la vida (ej., niñez o edad avanzada) o como resultado de factores externos que contribuyen a que individuos tengan una

exposición desproporcionadamente mayor a altas concentraciones que el resto de la población (ej., estado socio económico).

- Individuos con enfermedad respiratoria pre-existente están a mayor riesgo de experimentar efectos en la salud asociados con  $\text{SO}_2$  que la población general.
- Estudios epidemiológicos sugieren que los niños y adultos mayores están en riesgo mayor de los efectos del  $\text{SO}_2$ . Los adolescentes no estarían ni más ni menos en riesgo que los adultos.
- Personas que ocupan largos períodos de tiempo al exterior y/o a elevadas tasas de ventilación, están probablemente a mayor nivel de riesgo de experimentar efectos adversos del  $\text{SO}_2$  en la salud.

## 4. ESTIMACIÓN DE LOS RIESGOS EN LA SALUD POR SO<sub>2</sub>

### 4.1. Metodología de búsqueda bibliográfica

La selección del material bibliográfico se llevó a cabo en etapas. En todo momento, debimos establecer la relevancia de la información de la literatura y la información obtenida del problema de contaminación. En la búsqueda, se trata de identificar factores y condiciones que son comunes a aquellos involucrados en la exposición y que conducen a los efectos negativos en la salud, tales como concentraciones aéreas del SO<sub>2</sub>, identificación de efectos considerados negativos en la salud, y parámetros que identifican al receptor.

En la investigación se utilizaron motores de búsqueda tales como Google, Google Scholar, y Copernic.

Bases de datos. Las bases de datos accedidas fueron PUBMED (que incluye MEDLINE y PREMEDLINE), USEPA, WHO, TOXLINE. Estos son específicos para el SO<sub>2</sub>. Los estudios identificados también incluyeron documentos preparados por organizaciones científicas y regulatorias tales como USEPA, WHO, HEI<sup>43</sup>, y NRC<sup>44</sup> y otras organizaciones internacionales, IRIS, RTECS, DOE, DOT, TARA, y otras agencias de gobierno y locales.

En la búsqueda se utilizó el nombre SO<sub>2</sub>, y los sinónimos sulfur dioxide, sulphur dioxide, sulphur oxides, y sulfur oxides, tanto en inglés como castellano, y el Número de Registro del Chemical Abstracts Service (CASRN). La descripción de los títulos usados contiene *efectos en la salud, efectos adversos, agudos, clínicos, no-clínicos*, estimación de riesgo, sin especificar el tipo de efecto, para aumentar el número de aciertos en la búsqueda. Documentos que no incluyen al SO<sub>2</sub> en forma explícita no fueron considerados.

Los estudios identificados fueron limitados a publicaciones científicas de años recientes posteriores a alrededor de 1970, sujetas a proceso formal de peer-review, incluyendo artículos de periódicos científicos (journals), todos los cuales fueron evaluados sobre la base de su calidad técnica y científica. Un problema de la comparabilidad de los resultados debido a los diferentes métodos de análisis químicos, estadísticos y diseño experimental. La mayoría de la evidencia de la literatura científica proviene de efectos en el sistema respiratorio, y en forma limitada en otros sistemas animales. Los estudios incluyen sujetos sanos y otros con enfermedades respiratorias (asma o enfermedad crónica obstructiva pulmonar). Los criterios para la selección incluyeron calidad técnica, diseño experimental, control de las variables del estudio, y aspectos del informe.

---

<sup>43</sup> Health Effects Institute

<sup>44</sup> National Research Council

El objetivo principal de esta etapa fue identificar las concentraciones de SO<sub>2</sub> más altos que no están asociadas con efectos significativos en la salud en personas sanas o asmáticas. Si bien es debatible que un olor o irritación sensorial moderados pueden ser consideradas como verdaderos efectos en la salud, éstos pueden ser categorizados como que influyen en la calidad de vida, y las guías de calidad de aire han sido establecidas sobre las bases de irritación sensorial u olor como efectos críticos.

#### 4.1.1. Estudios seleccionados

En nuestra investigación, identificamos numerosos estudios con extensos reviews de la literatura científica especializada. El propósito de todos ellos fue desarrollar un entendimiento cualitativo y cuantitativo del conocimiento de la relación dosis-respuesta entre exposición al SO<sub>2</sub> y los efectos en la salud. Para cada uno de estos, se utilizó el proceso de selección descrito anteriormente. Los reviews seleccionados se discuten a continuación.

##### Estudio Alberta Health and Wellness, Canadá

El principal estudio bibliográfico identificado fue:

*Health Effects Associated with Short-term Exposure to Low Levels of Sulphur Dioxide (SO<sub>2</sub>) – A Technical Review. Alberta Health and Wellness, Health Surveillance, Edmonton, Alberta. Canadá (2006). ISBN 0-7785-3480-4. [www.health.gov.ab.ca](http://www.health.gov.ab.ca)*

En un extenso análisis bibliográfico conducido por Alberta Health and Wellness, Canada (AHW), se *identificaron* 347 estudios que cumplieron con los criterios de *inclusión* en el estudio. De éstos, 184 estudios fueron juzgados de baja calidad y sólo 15 fueron juzgados de alta calidad sin debilidades en diseño del estudio y en el informe.

Estudios clínicos controlados. AHW no identificó estudios clínicos de alta calidad en el rango de tiempo de 1 a 10 minutos de exposición, sino varios de calidad moderada.

Estudios en animales. Estos se analizaron independientemente de los estudios en humanos, y no intentamos hacer extrapolaciones de ensayos en animales a efectos en humanos.

Estudios epidemiológicos. De acuerdo con AHW, los estudios epidemiológicos contienen una estimación de exposición inexacta o inadecuada de la exposición, ya que asumen estimaciones muy gruesas en cuanto a los niveles de SO<sub>2</sub>, no hay evidencia de presencia o ausencia de co-contaminantes aéreos, hay errores en las clasificaciones de la exposición, y finalmente que los estudios basados en epidemiología no demuestran causalidad sino sólo asociación. Los estudios epidemiológicos son generadores de hipótesis, pero no se aplican para examinar una hipótesis. Muchos de estos estudios se apoyan fuertemente en métodos estadísticos, los que requieren conocer el método y su interpretación. De la misma manera, los estudios clínicos y de toxicología animal también presentan debilidades, las que fueron consideradas en el proceso de selección,

como p.ej., el uso de una sola concentración que no permite determinar una relación dosis-respuesta, uso de un solo sexo, o el uso de solo pocos sujetos.

**Tabla 37. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos – 1 a 5 minutos de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.1 (260)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bronchoconstriction at lower concentrations in dry air than humidified air (AA 057)</li> </ul>	3 min.
0.5 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA 061), greater with oral than nasal exposure (AA 074), with cold dry air (AA123)</li> <li>Dryness, irritation, or burning of the throat (to 5 ppm:HA 039)</li> <li>Chest tightness, wheezing, dyspnea (and 1ppm: AA 064)</li> <li>Increased Bronchoconstriction (AA 326)</li> </ul>	3min. 3x30 min/5/3 min 1 to 5 min 1,3,5 min. 5 min.
0.60 (1600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased respiratory function (AA 314)</li> </ul>	5 min.
0.75 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increase SRaw with hyperventilations 318</li> </ul>	5 min.
<1 (<2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Chest Tightness, wheezing, dyspnea, cough (AA 093)</li> </ul>	1,3, or 5 min.
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA 062,064)</li> </ul>	4,min/1,3,5 min.
2 (5200)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Changes in SRaw (AA 062)</li> </ul>	4 min.
10 (26000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bronchial obstruction, returned to control by 45-60 min post-exposure (AA 260)</li> </ul>	3 min.

**Tabla 38. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos – 6 a 10 minutos de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.2 (500)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased respiratory frequency (AA 071)</li> </ul>	10 min.
0.25 (600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA 118)</li> </ul>	10 min.
0.3 (800)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased Bronchoconstriction, returned to normal levels 30 min. post- exposure (and 0.6 ppm; AA 097)</li> </ul>	10 min.
0.5 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dose –dependent change in respiratory function (to 1ppm;AA 077)</li> <li>Reduction in FEV<sub>1</sub>, V max 50, V max 75, (AA 055)</li> </ul>	10 min. 10 min.
0.60 (1600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased respiratory function (AA 344)</li> </ul>	10 min.
0.75 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduction in FEV<sub>1</sub>, increased total respiratory resistance (AC 103)</li> <li>Increased SRaw (AA 304)</li> </ul>	10 min. 10 min.
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduction in FEV<sub>1</sub>, V max 50, V max 75 (AC 038,102)</li> <li>Slight reduction in FEV<sub>1</sub>, V max 50, V max 75 or increased bronchoconstriction after exercise (HC 042)</li> </ul>	30' r, 10' e/10' 30' r, 10' e
2 (5300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Changes in SRaw (AA 303)</li> </ul>	10 min.
2.5 (6600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased specific airway conductance greater with oral than nasal exposure (HA 105)</li> </ul>	10 min. to 1 hr.
5 (13000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>SRaw exhibited in all subjects 375</li> </ul>	10 min.
15 (39000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased pulmonary flow resistance; greater from oral than nasal exposure (HA 054)</li> </ul>	10 min.

Ref: Alberta Health and Welfare, Canada. Health Effects Associated with Short-term Exposure to Low Levels of Sulphur Dioxide (SO<sub>2</sub>) – A Technical Review. ISBN 0-77-3480-4. 2006.

**Tabla 39. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos – 11 a 30 minutos de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.1 (300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Slight reduction in FEV1, V max 50 (AC 277)</li> </ul>	15 min.
0.5 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA 109)</li> <li>Dose- dependent effect on FEV1, V max 50, V max 75 (to 1 ppm;AA 098)</li> <li>Increased SRaw greater with oral than nasal exposure (AA 074)</li> </ul>	30 min. 30 min. 3x30 min.
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduction in FEV1, V max 50, V max 75 (AC 038), (AA110)</li> <li>Slight reduction in FEV1, V max 50, V max 75 or increased bronchoconstriction after exercise (HC 042)</li> <li>Decreased MEF 50% vc (HA 070)</li> <li>Functional impairment of alveolar macrophages (to 50 ppm 308)</li> </ul>	30' r, 10'e/20 min. 30'r, 10'e 15 min. 30 min.
2 (5300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Difference in ventilator parameters between forced oral and free-breathing exposure (HA 266)</li> </ul>	30 min.
2.5 (6600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased specific airway conductance greater with oral than nasal exposure (HA 105)</li> <li>Dose- dependent increase in ciliary beat frequency (to 12,5 ppm 320,427)</li> </ul>	10 min to 1 hr. 30 min.
4 (10000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased alveolar activity in BAL (and 8ppm;HA 083)</li> </ul>	20 min.
8 (21000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increases in macrophages, lymphocytes, and mast cells in BAL (HA 0090)</li> </ul>	20 min.

**Tabla 40. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos – 31 minutos a 4 horas de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.5 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA051)</li> <li>Reduction in FEV1, V max 50, V max 75 (AC 099)</li> </ul>	75 min 50 min
0.75 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased SRaw (AA050)</li> <li>Increased SRaw initially, decreased to pre-exposure levels after 1 hr. of exposure (AA079)</li> </ul>	2 hours 3 hours
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased spirometric function (HA096)</li> <li>Increased SRaw (HA 047), (AA 078)</li> </ul>	4 hr/d3d/wkx3 2 hrs/ 1hr
2.5 (6600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased specific airway conductance greater with oral than nasal exposure (HA 105)</li> </ul>	10 min to 1 hr
5 (13000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased MMFR, increased bronchial clearance (HA 045, 056)</li> <li>Decreased nasal mucous Flow rate (HA 048)</li> </ul>	2.5 hr/3 hr 4 hr

**Tabla 41. Efectos respiratorios asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos > 4 horas de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased spirometric function (HA096)</li> <li>Decreased nasal mucous Flow rate (HA 063)</li> <li>Discomfort proportional to SO<sub>2</sub> Concentrations (to 25 ppm; HA 063)</li> </ul>	4 hr/d3d/wkx3 6hr/dx 3d 6hr/dx 3d

**Tabla 42. No efectos asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios clínicos humanos**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.20 (520)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No significant effect to pulmonary function in asthmatics (AA 057)</li> </ul>	6 hours
0.40 (1000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No change in FEV1 in healthy males with moderate exercise (HA 051,049)</li> </ul>	2 hours
0.50 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No significant effect in pulmonary function parameters for asthmatic (mouthpiece breathing; moderate exercise, from 0.25 ppm; AA 075)</li> <li>No effect on pulmonary function parameters (HA 073)</li> </ul>	1 hour (alternating rest with 10 min exercise ) 3 hour
0.60 (1600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No significant pulmonary effects for normal and atopic subjects with exercise ( from 0.2 ppm; HA ,AA 300)</li> </ul>	1 hour (incl. 3-10 min exercise periods)
0.75 (2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No effect on pulmonary function during or after exposure with exercise in healthy subjects (HA 045)</li> </ul>	4 hours (with 2-15 min exercise periods)
0.80 (2100)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No effect on pulmonary function for patients with COPD with exercise (from 0.4 ppm; AA101)</li> </ul>	1 hour
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No changes in pulmonary function for healthy subjects (from 0.25 ppm;HA 306)</li> <li>No pulmonary function effects with exercise (HA 122)</li> <li>No changes in pulmonary function or bronchial reactivity (HA 010)</li> </ul>	40 min (exercise) 2 hour (3-30 min exercise periods) 4 hr/d, 3d/wk for 3 wk
2 (5200)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No changes in pulmonary functions with free breathing, forced oral, and force nasal (HA 266)</li> <li>No change in pulmonary function with exercise (HA 047)</li> </ul>	30 min 2 hours
3.6 (9100)	<ul style="list-style-type: none"> <li>No significant changes in pulmonary function parameters afters exposure with normal breathing and hyperventilations (from 1.1 ppm;HA 113)</li> </ul>	30 min

**Tabla 43. Efectos respiratorios “positivos” asociados con exposición de corto tiempo al SO<sub>2</sub>: Hallazgos en estudios toxicológicos con animales por sobre 2 horas de exposición.**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Effects	Exposure Duration
0.5 (1300)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dose- dependent increases in lung resistance (and 5ppm; rabbits 197)</li> </ul>	45 min
1 (2600)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increased respiratory resistance; decreased compliance (guinea pigs 229)</li> <li>Dose- dependent increase in bronchoconstriction (to 2.5 ppm;</li> </ul>	1 hr 10 min/ 1 hr

Concentration ppm ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Effects	Exposure Duration
	guinea pigs 245,246) <ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased proportions of macrophages in white cells (to 5 ppm; guinea pigs 245)</li> </ul>	10 min
10 (26000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inhibition of ciliary movement (rabbits 468)</li> </ul>	1 hr
15 (39000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dose- dependent increased in ciliary activity (to 77 ppm; guinea pigs 213)</li> </ul>	2 to 6 min
17 (44000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dose dependent respiratory depressions (to 298 ppm; Mice 243)</li> </ul>	10 min
50 (131000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduction in pulmonary macropage endocytosis (hamsters 374)</li> <li>Reduced dynamic compliance (dogs 189)</li> </ul>	Unreported 15 min
100 (262000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Increase in minute volumen (chikens 183)</li> </ul>	60 min
200 (524000)	Decrease Breathing frecuency , increased tidal volumen (rabbits 244)	15-20 min
500 (1310000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Decreased Sraw (Chikens 183)</li> <li>Changes to bioelectric properties and increased nonelectrolyte permeability (dogs 150)</li> </ul>	60 min 75 min
800 (2096000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reductions in minimal and maximal pulmonary surface tension (rats 335)</li> </ul>	1 hr
1000 (2620000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Initial decrease then increase in SRaw, increased respiratory frecuency, decreased minute volumen (chikens 183)</li> </ul>	60 min

**Conclusión.** El estudio AHW provee una extensa y sólida evidencia respecto de concentraciones mínimas que producen efectos marginales en la salud, información que permite deducir valores útiles para desarrollar la normativa en estudio. Este documento es altamente recomendado para seleccionar concentraciones de SO<sub>2</sub>, duración de la exposición, y efectos considerados críticos.

### **Estudio National Environment Protection Council, Australia**

*A Review of Existing Health Data on Six Pollutants. National Environment Protection Council, Australia. ISBN 0 642 323 29 1. May 1997.*

De acuerdo con el National Environment Protection Council (NEPC), las pautas de protección a exposiciones de corto plazo durante períodos de 10-15 minutos deben ser considerados como una clara evidencia en estudios controlados que los asmáticos en ejercicio puede experimentar algunos cambios en la función pulmonar en asociación con síntomas respiratorios después de períodos cortos de exposición.

Como el SO<sub>2</sub> se puede presentar con frecuencia como breves peaks agudos, dependiendo de las características de las fuentes y meteorología locales, no es razonable extrapolar estos períodos cortos de la exposición a períodos promedios más extensos como 1 hora. En la actualidad, el cuerpo de opinión favorece la sugerencia que cualquier pauta de corto plazo no debe superar una concentración de 0,175 ppm (500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) promediados por 10 minutos.

Exposiciones diarias y a largo plazo conducentes a cambios en la morbilidad, mortalidad, o a alteraciones en la función pulmonar deban ser evaluados sobre la base de los estudios epidemiológicos disponibles donde las personas están expuestas a mezclas de contaminantes, que generalmente, pero no necesariamente, incluyen material particulado. Anteriormente, era una práctica habitual basar la salud con las pautas o normas sobre el LOAEL observado, corregidas por un factor de seguridad (incertidumbre) de dos para asegurar la adecuada protección de los individuos susceptibles. Sin embargo, estudios más recientes sugieren la posibilidad de efectos adversos significativos de la salud pública a niveles considerablemente más bajos que los que se habían previsto anteriormente (por ejemplo, una guía de 24 horas de 0,04 ppm / 125 µg/m<sup>3</sup>; o una pauta anual de 0,02 ppm / 50 µg/m<sup>3</sup>).

Según NEPC, “existe una incertidumbre considerable en cuanto a si el SO<sub>2</sub> en realidad es o no responsable de los efectos adversos observados en la salud, o si podría actuar en conjunto con contaminantes aún no identificados, posiblemente un material particulado.” NEPC estima que hay datos insuficientes disponibles para basar cualquier mayor ajuste de las regulaciones disponibles, para proporcionar una protección adecuada para la población asmática 'en riesgo' en Australia.

### **Conclusión.**

NEPC identificó y revisó un número de estudios de índole epidemiológico. El nivel más bajo de SO<sub>2</sub> identificado para varias poblaciones diferentes (general, ancianos, individuos con enfermedad respiratoria, individuos con enfermedad cardiovascular) fue de 2,02 µg/m<sup>3</sup> en promedio para 24 horas. El marcador final de salud observado fue “mortalidad”. Los niveles de SO<sub>2</sub> observados fueron variables, entre 2 – 310 µg/m<sup>3</sup>, donde los máximos llegaron hasta 1283 µg/m<sup>3</sup>, con dispersión en los tiempos de exposición. Otros co-contaminantes que agregan confusión al estudio incluyen TSP, PM<sub>20</sub>, NO<sub>x</sub>, ozono, negro de humo, CO, PM<sub>13</sub>, PM<sub>10</sub>, humo, NO<sub>2</sub>, NO, y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Los resultados así como se presentan, no permiten identificar valores útiles para desarrollar una normativa para el SO<sub>2</sub>.

### **European Commission, Health and Safety at Work- The Scientific Committee on Occupational Exposure Limits (SCOEL).**

*Recommendation for the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Sulphur Dioxide SCOEL/SUM/27. Updated, December 2009.*

### **Tabla 44. Efectos claves en la salud humana por exposición a peaks en adultos sanos**

TABLE: KEY HUMAN HEALTH EFFECTS OF PEAK EXPOSURE IN HEALTHY ADULTS

SO <sub>2</sub> Concentration (ppm)	Exposure Duration	Observed Effects	Size of population	References
0.5	1 hour	No change in lung function, including specific airway resistance in healthy adults exposed (with exercise).	24	Linn et al. ( 1987)
0.2	1hour	No changes in pulmonary functions and on heart rate at rest. Parameters of the spectral analysis of heart rate variability were increased ( p<0.05 for total power )	12 nonsmokes	Tunnicliffe et al. (2001)
0.2		Some weak and inconsistent evidence to suggest that SO <sub>2</sub> exposure may lead to changes in heart rate variability.		Routledge et al. (2006 )
≥ 1.0	3 min – 1h	<b>Among healthy adults, SO<sub>2</sub>-attributed decrements in lung function generally occur at concentrations above 1 ppm during exercise and above 5 ppm at rest. Markers of airway inflammation are significantly elevated at 4 h postexposure, reaching peak levels 24 h postexposure.</b>		<b>Amdur et al. (1953); Kreisman et al. (1976); Lawther et al. (1955,1975); Sandström et al. (1989); Sim and Pattle (1957); Snell and Luchsinger (1969)</b>
0.75 ppm	2 hours	Exercise for 15 minuts after 1 hour exposure increased airways resistance temporarily by 2 - 55 %	16 expose/ 15 control	Stacey et al.( 1981)
0.75 ppm	2 hours	Healthy adults with and without exercise - not affected pulmonary functions	231	Stacey et al (1983)
0.7 ppm	2 hours	Ciliary defects detected by electron microscopic examination	7	Carson et al (1987 )
1 ppm		Deep breathing by mouth increased specific airways resistance (sRaw)		Lawther et.al (1975)
1ppm	2 hours	Upper respiratory tract irritation in healthy adults performing moderate exercise ( exposure to SO <sub>2</sub> and 1mg/m <sup>3</sup> NaCl). The cause of effect is uncertain.		Frank (1980)
1-2 ppm	2 hours	Reduction in thoracic volume in non.smoking young volunteers		Bedi et al (1984)
4ppm				Archer et al.(1979)
8 ppm	20 min	Tightness in the chest and reduced FEV in workers Induced airways inflammation beyond the short time period	22 healthy men	Sandstrom et al. (1989)

TABLE: KEY HUMAN HEALTH EFFECTS OF PEAK EXPOSURE TO SULFUR DIOXIDE

SO <sub>2</sub> Concentration (ppm)	Exposure Duration	Observed Effects	Size of population	References
0.2-0.4	1min – 6h	<b>ASTHMATIC ADULTS:</b> Significant reductions in FEV <sub>1</sub> , and increases in specific Airways resistance (sRaw) observed among some asthmatic adults.		Bethel et.al. (1985); Horstman et al. (1986); Linn et al. (1982,1983,1987); Schachter et al. (1984); Sheppard et al. (1981); Tunnicliffe et al. (2001,2003)
0.2	1h	No association between respiratory symptoms, lung functions and 1 h exposure to SO <sub>2</sub> at rest in either asthmatics or healthy. No significant changes in max.or minimum heart rates. Higher total power in healthy.	12 asthmatics/ 12 healthy	Tunnicliffe et al. (2003)
0.2	6 hours	Airways response to inhaled house-dust-mite antigen at exposure to 0.2 ppm SO <sub>2</sub> . No changes in lung functions.	10 atopic asthmatic	Devalia et al. (1994)
0.25	1 h	During heavy exercise mild bronchoconstriction		Bethel et al. (1985)
0.25-0.5		Moderate exercise for 10 min, than rest and repeated in 1 week intervals did not induced changes in pulmonary functions	24 young asthmatics	Linn et al.(1987)
0.4-0.6	1 min – 2h	<b>Decrements in lung function observed between 0.4 – and 0.6-ppm SO<sub>2</sub> in asthmatic adults and adolescents during exercise. Significant interindividual variability in response has been consistently demonstrated. Effects observed within 1-5 min of exposure are generally not enhanced by increasing exposure duration. Respiratory symptoms (e.g., wheezing and chest tightness) increase with increasing exposure concentrations above 0.4 ppm. No respiratory effects reported in healthy, non-asthmatic.</b>		Balmes et al. (1987); Bedi et al. (1979); Gong et al. (1995); Horstman et al. (1986); Koenig et al.(1983); Linn et al. (1982,1983,1987); Magnussen et al. (1990); Schachter et al. (1984); Sheppard et al. (1981)
0.5 ppm		Development of tolerance in asthmatic subjects exposed repeatedly to bronchoconstriction effects at 0.5 ppm SO <sub>2</sub>		Shepard et al.(1983)
0.5			7/8	Balmes et al. (1987)

	3 min.	During eucapnic hyperpnoe respiratory symptoms – wheezing, chest tightness	asthmatic	
0.6-1.0	1 min – 2h	Specific airway resistance shown to double following 10-min exposures to SO <sub>2</sub> concentrations between 0.25 and 0.75 ppm with moderate exercise in 50% of asthmatics tested. Some evidence of an increase in airway resistance in healthy, non-asthmatic subjects exposed to SO <sub>2</sub> , among asthmatics during exercise, even with continued SO <sub>2</sub> exposure.		Balmes et al. (1987); Gong et al. (1995); Hackney et al. (1984); Horstman et al. (1986,1988); Koenig et al. (1983); Linn et al. (1985, 1987); Schachter et al. (1984); Stacy et al. (1981)
0.6	1 hour	Exposure to SO <sub>2</sub> and exercise increased severity of respiratory symptoms in moderate/severe asthmatics. Abatement within < 1 h.		Linn et al. (1987)
0.75	3 h	Bronchoconstriction induced by 10 min heavy exercise, than rest, bronchoconstriction reversed immediately by rest	17 young asthmatics	Hackney et al. (1984)
0-, 0.5- .1.0		SO <sub>2</sub> sensitive asthmatics respiratory symptoms increased with increased SO <sub>2</sub> concentration from 0-, 0.5-, and 1 ppm SO <sub>2</sub> following 10 min exercise.		Gong et al. (1995)
< 0.6	1h	sRaw doubled in moderate/severe asthmatics	24 healthy, 21 atopic non asthmatics, 16 mild and 24 moderate/severe	Linn et al. (1987), Hackney et al. (1987)
< 1 ppm	5 min	Moderate to heavy exercise in asthmatics is leading to significant bronchoconstriction or increase in sRaw		Linn et al. (1983)

Ref: Recommendation for the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for Sulphur Dioxide SCOEL/SUM/27. Updated, December 2009.

## 4.2. Desarrollo de niveles de referencia para el SO<sub>2</sub>

Numerosos contaminantes aéreos pueden causar efectos en la salud después de una exposición aguda o de corto plazo que puede durar pocos minutos o varios días. Los métodos usados para estudiar la dosis-respuesta de exposiciones agudas son en general similares a la metodología para exposiciones crónicas, y requieren la identificación de un “efecto crítico”, y determinación de un valor comparable para tal efecto.

Se llevó a cabo un esfuerzo intensivo de búsqueda computarizada haciendo uso de motores de búsqueda. Se identificaron por sobre 1000 publicaciones, de las cuales seleccionamos alrededor de 80 que discuten diversos enfoques para la generación y análisis de datos de concentraciones aéreas y efectos en la salud. De éstos últimos, se descartaron estudios de índole clínico o toxicológico que no tienen utilidad para el desarrollo de los niveles de referencia, tales como uso de muy altas concentraciones, estudios de índole patológico, y otros. Los estudios fueron además seleccionados sobre la base del aporte a la solución del problema en cuestión y su calidad científica.

En esta fase identificamos un número de metodologías desarrolladas por organizaciones de prestigio y con diferentes propósitos en relación con exposición de corto plazo, sin considerar niveles ocupacionales o de emergencia. Estos estudios se describen a continuación.

### 4.2.1. Metodología USEPA NAAQS

Basándose en su examen de los criterios de calidad de aire para los óxidos de azufre y el estándar primario nacional de calidad del aire ambiental (NAAQS) para los óxidos de azufre medido en forma de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), EPA revisó la normativa NAAQS primaria del SO<sub>2</sub> para proporcionar la necesaria protección de la salud pública con un adecuado margen de seguridad. Específicamente, la EPA estableció un nuevo estándar de SO<sub>2</sub> de 1 hora a un nivel de 200 µg/m<sup>3</sup>, basado en el promedio de 3 años del percentil 99% anual de las concentraciones máximas diarias de 1 hora. La EPA también revocó tanto las normas primarias de 24 horas y las anuales de SO<sub>2</sub> existentes.

Bajo el mandato de la Clean Air Act (Ley Federal del Aire Limpio), el Administrador de USEPA debe identificar y preparar una lista de los contaminantes del aire que cumplan con ciertos criterios, incluyendo el contaminante del aire que "en su juicio causa o contribuyen a la contaminación atmosférica que puede razonablemente anticiparse que pone en peligro la salud pública y bienestar social" y "la presencia el cual en el aire ambiente resulta de numerosos o diversas fuentes móviles o estacionarias." La metodología PNAASQ se basa en tres documentos oficiales, que fueron analizados por completo e incorporados en este estudio. En Junio 22, 2010, la USEPA publicó la más reciente revisión del estándar primario de calidad de aire ambiental para el SO<sub>2</sub>, el que se describe en:

*Risk and Exposure Assessment to Support the Review of the SO<sub>2</sub> Primary National Ambient Air Quality Standards: Final Report. U.S. Environmental Protection Agency,*

*Office of Air Quality Planning and Standards, Health and Environmental Impacts Division, Research Triangle Park, North Carolina Office. EPA-452/R-09-007. July 2009.*

En 2010 la USEPA publicó<sup>45</sup> en el Federal Register (Diario Oficial) de los EE.UU., el estándar primario de calidad de aire ambiental (NAAQS) para el SO<sub>2</sub>, que incluye aspectos metodológicos

*FR20100622, Part II. Environmental Protection Agency. 40 CFR Parts 50, 53, and 58. Primary National Ambient Air Quality Standard for Sulfur Oxide; Final Rule. June 22, 2010. Pp. 35520-35603.*

En Marzo 2014 finalmente se publica un plan integrado de revisión de elementos que definen el NAAQS:

*Integrated Review Plan for the Primary National Ambient Air Quality Standard for Sulfur oxide. External Review Draft. U. S. Environmental Protection Agency National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development and Office of Air Quality Planning and Standards Office of Air and Radiation Research Triangle Park, North Carolina March 2014.*

Basándose en su examen de los criterios de calidad de aire para los óxidos de azufre, EPA revisó la normativa NAAQS primaria del SO<sub>2</sub> con el fin de proporcionar la necesaria protección de la salud pública con un adecuado margen de seguridad, de acuerdo al mandato de la Sección 109 de la Ley Federal del Aire Limpio (Clean Air Act).

Específicamente, la EPA reemplazó los estándares existentes de 24-h y anual con un nuevo estándar de corto plazo basado en un promedio de 3 años del percentil 99 de la distribución de concentraciones de SO<sub>2</sub> de 1 hora. USEPA

Simultáneamente, la EPA revocó tanto las normas primarias de 24 horas y las anuales de SO<sub>2</sub> existentes.

### **Descripción del método**

La metodología usada por EPA para revisar y desarrollar los nuevos estándares es compleja, y basada en modelación matemática de información específica para los EE.UU. Así, la salud pública considerada proviene de datos de censos poblacionales, información acerca de la geografía regional, y la meteorología corresponden a condiciones particulares

La metodología PNAQS requiere una abundante descripción de mediciones del SO<sub>2</sub> y factores relacionados (métodos de análisis - UV fluorescencia, quimioluminiscencia-, calidad de los datos, interferencias, etc.), características del sitio de monitoreo,

<sup>45</sup> FR20100622, Part II. 40CFR Parts 50, 53, and 58. Primary National Ambient

presencia de árboles, caminos, ubicación de los monitores respecto de las poblaciones, entre otros.

El modelo hace uso de población total y tres subgrupos sensibles (bajo los 5 años de edad, de 5 a 17 años, y sobre los 65 años), a partir de datos de censo más reciente, y localización de las estaciones de monitoreo a varias distancias, información que define la densidad poblacional. Cada estación de monitoreo fue capaz de medir CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM10, PM2,5, y SO<sub>2</sub> a una distancia de hasta 15 km, fuentes las cuales se identificaron como caldera de combustión externa o motores de combustión interna.

Los datos fueron registrados por dos años, tabulados, y graficados, de acuerdo con los siguientes distribuciones de concentraciones de SO<sub>2</sub> para dentro y fuera de las áreas definidas como metropolitanas: 1-h concentración máxima, 1-h concentración promedio, 24-h concentración promedio, concentración promedio anual, y concentración promedio agregada de 3 años. Cada uno de éstos se subdividió en dentro o fuera del área metropolitana. Los resultados se tabularon como número de muestras (n), media, máxima, y percentiles. Un número de estaciones de monitoreo reportó valores de SO<sub>2</sub> máximos de 5-min promedios en cada hora. Las contribuciones del SO<sub>2</sub> background al SO<sub>2</sub> medido fueron estimadas usando modelos globales de química troposférica incluyendo todas las fuentes en los EE.UU., Canadá y México con el modelo MOZART-2. Para los promedios de concentración de SO<sub>2</sub> de cada ciudad estudiada, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, entre otros.

Se hizo uso de tres métodos de análisis de los monitores de exposición personal para medir la exposición individual al SO<sub>2</sub>, información que fue utilizada para estimar la asociación entre concentración de la exposición personal y la concentración ambiental. Esta información pone de manifiesto el error en usar la concentración ambiental de un contaminante aéreo como indicador de exposición en vez de usar la exposición personal real del contaminante en los estudios epidemiológicos.

Los datos permiten estimar la relación entre variaciones día a día de la concentración ambiental del SO<sub>2</sub> y la variación en los promedios para la comunidad, como también la relación entre concentración de SO<sub>2</sub> promedio de la comunidad y el promedio de la exposición personal al SO<sub>2</sub> ambiental.

El modelo PNAAQs hace uso de modelos de simulación de exposición humana y dosis (SHEDS), modelo de exposición de contaminantes aéreos (APEX), y modelado ambiental para riesgo total (MENTOR-1A), todos ellos para demografía de la población y patrones de actividad.

## Conclusión

Sobre la base del análisis descrito, concluimos que el modelo PNAAQs es detallado, preciso y robusto, pero altamente complejo, y por lo tanto difícilmente reproducible y aplicable a las condiciones en Chile. Aplicación del modelo requeriría verificar los valores numéricos de entrada al modelo que sean apropiados para la situación en Chile (datos meteorológicos y validación de los cambios introducidos). Nuestros recursos

computacionales y profesionales no se encuentran disponibles para enfrentar proyectos de esta envergadura.

#### 4.2.2. Metodología World Health Organization

El modelo WHO de estimación de riesgos asociados con niveles de contaminación ambiental se describe en los siguientes dos documentos:

*Outdoor Air Pollution. Assessing the Environmental Burden of Disease at National and Local Levels Pollution. Environmental Burden of Disease Series, No. 5. Bart Ostro. WHO, Protection of the Human Environment. Geneva, 2004. ISBN 92 4 159146 3.*

*Worksheets to estimate: i) the attributable burden of disease from outdoor pollution (with background air pollution level), and ii) the health gains through the implementation of the WHO Air Quality Guidelines.*

*A Methodology for Estimating Air Pollution Health Effects. Bart Ostro. Office of Global and Integrated Environmental Health, World Health Organization, Geneva. WHO/EHG/96.5 April 1996.*

El modelo WHO, suplementado por plantillas Excel, fue obtenido mediante comunicación personal con Dr. Annette Prüss-Ustün, del Department of Public Health and Environmental and Social Determinants, World Health Organization, Geneva, Switzerland. Dr. Prüss-Ustün informó que las plantillas Excel se encuentran en revisión y serán puestas al día y recomendó no hacer uso de dichas plantillas hasta que se publique la nueva versión. Advirtieron que la evidencia de que se dispone en la actualidad es mucho más complicada, lo que requiere herramientas más complejas.

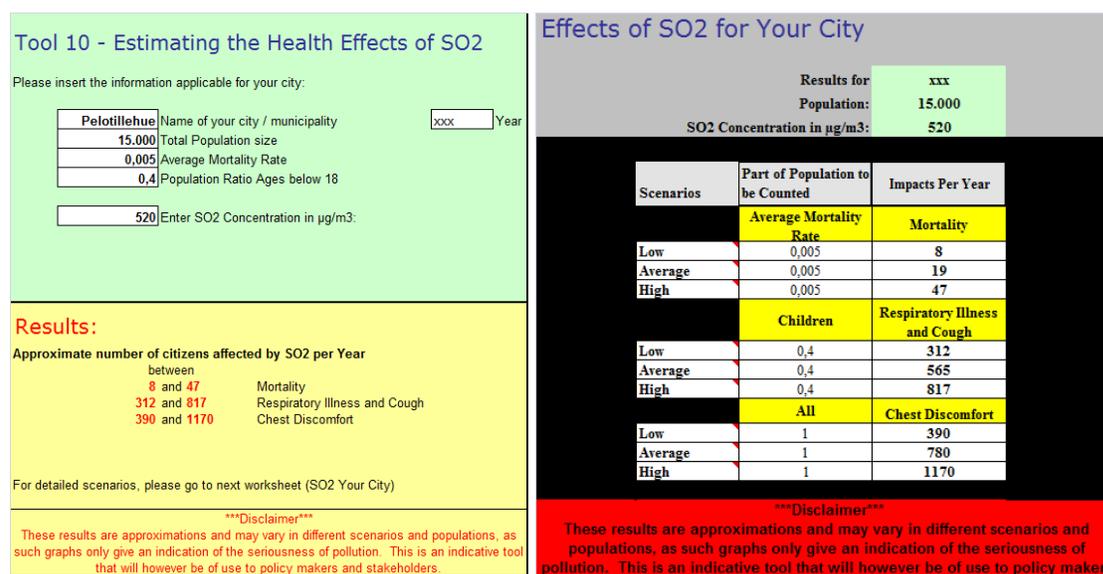
#### Descripción del método

La metodología WHO se encuentra descrita en el documento desarrollado por la Urban Air Quality Management (AQM) Toolbox, United Nations Environment Programme, WHO. Este documento explica las metodologías para estimar los efectos en la salud del material particulado PM10, CO, lead, ozono, compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos policíclicos aromáticos, y acid rain. Cada metodología se explica en capítulos separados denominados Toolbox.

En Figura 128, Sección Tool 10, Estimación de los Efectos del Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), se muestran las plantillas Excel que de acuerdo con los autores, “permiten estimar los efectos del SO<sub>2</sub> al demostrar los efectos de las concentraciones de SO<sub>2</sub> sobre las poblaciones urbanas.” La metodología WHO se basa en la estimación de los efectos en la salud de la contaminación aérea y puede ser aplicada a ciudades específicas. Los autores omiten síntomas clínicos críticos entre los efectos en la salud de una exposición a SO<sub>2</sub>, como así las concentraciones aéreas que se asocian a los efectos en la salud.

La metodología hace uso de un enfoque epidemiológico, basado en un mínimo de variables de entrada, tales como concentración de SO<sub>2</sub>, nombre de la ciudad a estudiar, población total, tasa de mortalidad promedio, y edad promedio de la población bajo los 18 años. De acuerdo con los autores, estos datos permiten estimar los rangos de mortalidad, enfermedad respiratoria y tos, y molestias en el pecho (Figura 128). Es implícito que los cálculos requieren del uso de un factor dosis-efecto, pero no se lo menciona ni tampoco cómo se calculó.

En el ejemplo descrito en Figura 128, se supuso un poblado hipotético de 15000 habitantes, con una tasa de mortalidad de 0,005, y una población de menores de 18 años de 0,4. Estos valores pueden ser representativos de cualquier población de Chile, y de allí la importancia de los resultados estimados.



**Figura 128. Ejemplo de una estimación de efectos en la salud asociados con SO<sub>2</sub> y para una ciudad hipotética usando la metodología Toolbox 10.**

En el presente ejemplo, se usaron los valores AEGL -1, -2, y -3 como concentraciones de SO<sub>2</sub>. Para una concentración de SO<sub>2</sub> de AEGL1 = 520 µg/m<sup>3</sup>, los resultados son los siguientes:

**Tabla 45. Ejemplo de una estimación de efectos en la salud asociados a SO<sub>2</sub>**

Conc SO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>	Mortalidad	Enfermedad respiratoria y tos	Molestias pecho y tos
AEGL1 = 520 µg/m <sup>3</sup>	8 - 47	312 - 817	390 - 1170
AEGL2 = 1950 µg/m <sup>3</sup>	29 - 177	1170 - 3065	1463 - 4388
AEGL3 = 78000 µg/m <sup>3</sup>	117 - 708	4680 - 12262	5850 - 17550

Los resultados de esta modelación básica discrepan significativamente de los resultados de estudios clínicos. Así, p.ej., para un AEGL-1 de 520 µg/m<sup>3</sup> de SO<sub>2</sub>, el modelo WHO estima una mortalidad entre 8 y 47 personas, con un promedio de 19

personas (Tabla 45). Estos resultados son sobreestimados, ya que un AEGL-1 para el SO<sub>2</sub> está asociado con un NOEL de vasoconstricción en asmáticos, pero sin ser discapacitante.

El estudio Alberta, Respiratory Effects Associated with Shorter Exposure to SO<sub>2</sub>: Human Clinical Findings, identifica una concentración de 500 µg/m<sup>3</sup> (0,2 ppm, alrededor del AEGL-1) solamente con un aumento en la frecuencia respiratoria para una exposición de 10 minutos, y no reporta efectos significativos en la función pulmonar en asmáticos para una exposición de 6 horas (Tabla 44). Ninguna referencia informa mortalidad a estas concentraciones.

Los resultados de las Tablas WHO denotan una sobreestimación de efectos en la salud. Tal como se define un AEGL-1, es una concentración de SO<sub>2</sub> que está asociada con cambios mínimos no incapacitantes y reversibles.

Conclusiones. El modelo desarrollado por B. Ostro para la WHO no es aceptable para su uso ya que genera estimaciones de efectos en la salud que son exagerados y erróneos, y que contienen una gran incertidumbre en los resultados.

#### **4.2.3. Metodología National Research Council /National Academy of Sciences (NRC/NAS): Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGLs)**

Varias metodologías (Exposición Aguda de Referencia, EPA; Community Emergency Exposure Levels, NRC/NAC; Acute Minimum Risk Levels, ATSDR) han sido desarrolladas con diferentes propósitos en relación con exposición de corto plazo al SO<sub>2</sub>.

En el presente estudio identificamos y seleccionamos los Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGLs, del inglés *Acute Exposure Guideline Levels*), desarrollados por el National Research Council/National Academy of Sciences, NRC/NAS, USA), como valores más relevantes y aplicables para su uso en casos de emisiones aéreas de corto plazo para el SO<sub>2</sub>. Esta metodología se describe en:

*Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 8. Committee on Acute Exposure Guideline Levels; Committee on Toxicology; National Research Council. ISBN: 0-309-14516-3. National Academies Press, Washington, D.C. 2010. Pp. 393-447.*

De acuerdo con nuestro análisis, esta metodología es relevante, sólida y aplicable para su uso para los casos de emisiones aéreas adaptable a la población en Chile. El desarrollo de los AEGLs involucró a numerosos científicos y reguladores y fue sometido a extenso peer review. La metodología AEGL fue aplicada en el estudio CENMA de evaluación de exposición ambiental a sustancias contaminantes (SO<sub>2</sub>, presentes en el

aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví,<sup>46</sup> y fue elaborado para la Subsecretaría del Medio Ambiente, Marzo 2013.

## Bases científicas para los AEGLs

Los AEGLs representan valores de exposición umbrales o techo de corto plazo que tienen el propósito de proteger al público en general, incluyendo a individuos susceptibles o sensibles, pero no a individuos hipersusceptibles o hipersensibles y pueden ser aplicados a períodos de exposición de emergencia que pueden ocurrir infrecuentemente en la vida de una persona (NRC, 2010).

Los AEGLs fueron desarrollados primariamente para proveer una guía en situaciones donde puede haber una exposición rara, típicamente accidental a una sustancia química específica que puede incluir al público general. Los AEGLs están basados primariamente en toxicología aguda y difieren de valores tales como PELs<sup>47</sup>, TLVs<sup>48</sup> o RELs<sup>49</sup>, en que éstos son valores *ocupacionales* crónicos o subcrónicos, y que son aplicables y provienen de ambientes ocupacionales y por lo tanto no son aplicables para el público en general. Los valores AEGLs no reflejan los efectos que pueden resultar de exposiciones frecuentes. Los AEGLs están diseñados para proteger a la población en general incluyendo a los ancianos, niños, y receptores susceptibles, grupos que generalmente no están considerados en el desarrollo de niveles de exposición en ambiente ocupacional.

El propósito fundamental del desarrollo de los AEGLs fue estimar niveles guías para exposiciones de una vez en la vida, de corto plazo (no crónicas o repetidas) a concentraciones aéreas de sustancias químicas agudamente tóxicas de alta prioridad. Los AEGLs son necesarios para un rango de aplicaciones en planificación de emergencias químicas, y programas de prevención y respuesta.

Los AEGLs representan valores biológicos de referencia para una población humana definida, y se distinguen por tres grados de severidad en los efectos en la salud biológicos y para cuatro períodos de exposición de emergencia (30 minutos, 1 hora, 4 horas, y 8 horas). En ciertos casos, se han desarrollado AEGLs para 5 o 10 minutos. Los tres grados de severidad AEGLs han sido definidos como sigue:

**AEGL-1** es la concentración en aire, expresada en partes por millón (ppm) o en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de una sustancia por sobre la cual se predice que en la población general, incluyendo personas susceptibles, pueden experimentar molestia notable, irritación, o ciertos efectos asintomáticos no sensoriales. Los efectos sin embargo no son discapacitante y son pasajeros y reversibles con la cesación de la exposición.

<sup>46</sup> “Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví”. (Licitación 608897-124-LP11). Subsecretaría del Medio Ambiente, abril 2013.

<sup>47</sup> PEL = Permissible Exposure limit

<sup>48</sup> TLV = Threshold Limit Value

<sup>49</sup> REL = Recommended Exposure Limit

**AEGL-2** es la concentración en aire, expresada en partes por millón (ppm) o en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de una sustancia por sobre la cual se predice que en la población general, incluyendo personas susceptibles, pueden experimentar efectos adversos en la salud que son irreversibles o serios, de larga duración o un deterioro en la habilidad para escapar.

**AEGL-3** es la concentración en aire, expresada en partes por millón (ppm) o en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de una sustancia por sobre la cual se predice que en la población general, incluyendo personas susceptibles, pueden experimentar efectos en la salud que ponen en peligro la vida o pueden causar la muerte.

Concentraciones en aire por debajo un AEGL-1 representan niveles de exposición que pueden producir moderado y progresivamente aumento pero no discapacitante olor, sabor, e irritación sensorial o ciertos efectos asintomáticos no sensoriales. Con cada aumento en la concentración aérea, hay un progresivo aumento en la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los efectos descritos para cada AEGL específico. Aunque los valores AEGL representan umbrales para el público en general, incluyendo subpoblaciones susceptibles, tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades, se admite que individuos sujetos a respuestas únicas o idiosincráticas<sup>50</sup> pueden experimentar los efectos descritos a concentraciones por debajo de cada AEGL respectivo.

Los AEGLs desarrollados para el  $\text{SO}_2$  se describen en Tabla 46. Para el peso de evidencia, la concentración más baja de  $\text{SO}_2$  en el aire, 0,20 ppm ( $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es considerado un NOEL (Nivel de Efectos No Observado) observado en asmáticos en ejercicio. Los resultados sugieren que la mayor parte de la broncoconstricción inducida ocurre dentro de los 10 minutos y aumenta mínimamente o se resuelve después de los 10 minutos de exposición. Por lo tanto los valores AEGL-1 para el  $\text{SO}_2$  se consideran constantes para todos los tiempos de exposición más allá de los 10 minutos.

**Tabla 46. Concentraciones AEGL para el  $\text{SO}_2$**

Clasificación	10 min	30 min	1 h	4 h	8 h	Punto crítico de referencia
AEGL-1 No discapacitante	0,20 ppm	NOEL de broncoconstrictor en asmáticos en ejercicio (a)				
	$520 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$					
AEGL-2 Discapacitante	0,75 ppm	NOEL de broncoconstrictor en asmáticos ejercitando (b)				
	$1950 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$					
AEGL-3 Letalidad	30 ppm	BMCLC05 en ratas después de 4 h se exposición				
	$78000 (\mu\text{g}/\text{m}^3)$					

<sup>50</sup> Particular, singular.

El valor del AEGL para el SO<sub>2</sub> es constante para los 5 tiempos de exposición porque la broncoconstricción ocurre dentro de los primeros 10 min y aumenta mínimamente o se resuelve después de los 10 min de exposición.

(a) Linn et al., 1983b; Schacter et al., 1985; Roger et al., 1985, Jorres and Magnussen, 1990; Bethel et al., 1985. (b) Schacter et al., 1985; Hackney et al., 1985. (c) Cohen et al., 1973.

Ref.: NRC, 2010

El caso del SO<sub>2</sub> es especial dentro de las toxicidades de sustancias químicas. Esto, porque los efectos de broncoconstricción ocurren alrededor de los primeros tres minutos de exposición al SO<sub>2</sub>, y la severidad de la respuesta puede sostenerse por un tiempo bastante largo. Para los tres AEGLs, la concentración de SO<sub>2</sub> a partir de los 10 minutos de exposición es la misma hasta por 8 horas. Un AEGL-3 de 30 ppm (78000 µg/m<sup>3</sup>) de SO<sub>2</sub> es esencialmente letal a los 10 minutos de exposición en una persona susceptible.

La escala AEGLs es sólo una clasificación que describe la severidad creciente de efectos en la salud con la exposición (concentración x tiempo) al SO<sub>2</sub>. Cada valor AEGL (AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3) está definido por 5 tiempos de exposición (10 min, 30 min, 1 h, 4 h y 8 h). En cada estudio clínico controlado, se mide la concentración de exposición utilizada que produce determinados efectos (reducción en FEV<sub>1</sub>, relación FEV<sub>1</sub>/FVC, y flujo peak máximo) para cada tiempo de exposición. Así, los valores AEGL se pueden ordenar de menor a mayor, y para cada uno de ellos, se identifican cinco duraciones de exposición. Esto equivale a una escala de 15 puntos con valores crecientes de concentración y tiempo de exposición. Pacientes asmáticos en ejercicio los cuales fueron expuestos por 10 min a 0,20 ppm (520 µg/m<sup>3</sup>) no mostraron respuesta discapacitante (AEGL-1) pero una exposición a 0,75 ppm (1950 µg/m<sup>3</sup>) es discapacitante.

### Evidencia que sostiene el desarrollo de los AEGLs

**Tabla 47. Peso de evidencia para AEGL-1**

Concentration ppm (µg/m <sup>3</sup> )	Duration	Subjets	Exposure parameters	Effect	Reference
0.2 ppm (520)	5 min	8	23 °, 85 % RH, exercise 48 L /min	None	Linn et al., 1983b
0.25 ppm (660)	10-40 min	10	23 °C, 70% RH exercise 35L /min	None	Schacter et al., 1984
0.25 ppm (660)	5 min	19 9	23 °C, 36% RH, exercise 60L/min 23 °C, 36% RH exercise 80-90 L/min	SRaw ↑ 134% SRaw ↑ 139%	Bethel Et al., 1985
0.25 ppm (660)	75 min	28	26 ° C, 70 % RH, exercise 80-90 L/min	None	Roger et al., 1985
0.4 ppm (1050)	5 min	23	23 °C, 85% RH, exercise 48 L/min	Sraw ↑ 69% ↓Vel. Max 25-75 10%	Linn et al., 1983b
0.5 ppm (1310)	10-40 min	10	23 °C, 70 % RH, exercise 35 L/min	none	Schacter et al., 1984

**Tabla 48. Resultados seleccionados de exposición a SO<sub>2</sub> en humanos no asmáticos**

Concentration	Duration	Subjects	Exposure Parameters	Effect	Reference
1-8 ppm	10 min	14	Exposure through facemask	1-8 ppm: ↓Respiratory volume ↑ respiratory rate 5 ppm: dry throat	Amdur et al., 1953
0.75 ppm	2 h	16	21 °C, 60% RH, Treadmill exercise 45 min. after entering chamber	SRaw: ↑ 2-55% (14.6% avg)	Stacy et al., 1981
0.4 ppm 2.0 ppm 4.0 ppm	20 min	8	20 °C, 50% RH, exercise 75 W, last 15 min of exposure	No effects on respiratory function parameters. Nasal irritation: 4 ppm (5/8) Throat irritation: concentration-dependent at 0.4, 2, and 4 ppm	Sandstrom et al., 1988
4.0 ppm 8.0 ppm	20 min	10 4	20 °C, 50% RH, exercise 75 W	Transient concentration-related ↑ alveolar macrophage activity	Sandstrom et al., 1989a
8.0 ppm	20 min	22	20 °C, 50% RH, exercise 75 W	Transient concentration-related ↑ alveolar macrophage activity	Sandstrom et al, 1989b
4.0 ppm 5.0 ppm 8.0 ppm 11.0 ppm	20 min	22	20 °C, 50% RH, at rest	Transient ↑ in alveolar macrophage activity. Concentration-related up to 8 ppm, no further increase at 1 ppm	Sandstrom et al., 1989c
1.0 ppm	4 h	20	22.2 °C, 60% RH, exercise 100 W	No effects on lung function parameters. Upper respiratory irritation (4/20) Ocular irritation (1/20)	Kulle et al., 1984
1 ppm 5 ppm 13 ppm	10-30 min	11	Resting	No effects 39%↑ Pulmonary flow res. 72%↑ Pulmonary flow res. Peak response 5-10 min	Frank et al., 1962
1-2 ppm 4-6 ppm 14-17 ppm	30 min	6	Resting; exposures to SO <sub>2</sub> alone or in combination with 18 mg/m <sup>3</sup> NaCl	No effects ↑ Pulmonary flow resistance ↑ Pulmonary flow resistance	Frank et al., 1964
15 ppm 29 ppm	10 min	11	Compared nose breathing vs. mouth breathing	↑ Pulmonary flow resistance 15 ppm : 3% Nose; 20% mouth 29 ppm: 18% Nose; 65% mouth	Frank et al., 1964
0.55 ppm	10 min	11		No nasal or eye irritation	Dautebrande and Capps, 1950
1 ppm 5 ppm 25 ppm	6 h	15	Resting	No effects Irritation. ↓FEV <sub>1</sub> , ↓Nasal mucous flow Irritation. ↓FEV <sub>1</sub> , ↓nasal mucous flow	Andersen et al., 1974

**Tabla 49. Resultados seleccionados de exposición a SO<sub>2</sub> en humanos asmáticos**

Concentration	Duration	Subjects	Exposure Parameters	Effect	Reference
0.2 ppm	5 min	8	23 °C, 85% RH, exercise 48 L/min	None	Linn et al., 1983b
0.25 ppm	10-40 min	10	23 °C, 70% RH, exercise 35 L/min	None	Schacter et al., 1984
0.25 ppm	5 min	19	23 °C, 36% RH, exercise 60 L/min	SRaw ↑134%	Bethel et al., 1985
		9	23 °C, 36% RH, exercise 80-90 L/min	SRaw ↑139%	
0.25 ppm	75 min	28	26 °C, 70% RH, exercise 42 L/min intermittent	None	Roger et al., 1985
0.4 ppm	5 min	23	23 °C, 85% RH, exercise 48 L/min	SRaw ↑69% V <sub>max25-75</sub> ↓10%	Linn et al., 1983b
0.5 ppm	10-40 min	10	23 °C, 70% RH, exercise 35 L/min	None	Schacter et al., 1984
0.5 ppm	5 min	10	23 °C, 41% RH, exercise 60 L/min	SRaw ↑238%	Bethel et al., 1983a
0.5 ppm	5 min	9	23 °C, 80% RH, exercise 27 L/min	None	Bethel et al., 1983b
			23 °C, 80% RH, exercise 41 L/min	None	
			23 °C, 80% RH, exercise 61 L/min	SRaw ↑219%	
0.5 ppm	1 min	8	22 °C, 75% RH, exercise 60 L/min	SRaw ↑34%	Balmes et al., 1987
	3 min			SRaw ↑173%	
	5 min			SRaw ↑234%	
0.5 ppm	20 min	46	23 °C, 92% RH, exercise 30 L/min for 10 min	SRaw ↑131%	Magnussen et al., 1990
0.5 ppm	30 min	14	24 °C, 50% RH, at rest	None	Jorres & Magnussen, 1990
0.5 ppm	50 min	10	22 °C, 75% RH, 30 min rest + 20 min exercise 43 L/min . Facemask	Nasal resistance ↑30% FEV <sub>1</sub> ↓16% V <sub>max-50</sub> ↓26% V <sub>max-75</sub> ↓26%	Koenig et al., 1985
0.5 ppm	50 min	10	22 °C, 75% RH, 30 min rest + 20 min exercise 43 L/min . Mouthpiece	Nasal resistance ↑32% FEV <sub>1</sub> ↓24% V <sub>max-50</sub> ↓46% V <sub>max-75</sub> ↓56%	Koenig et al., 1985
0.5 ppm	75 min	28	26 °C, 70% RH, exercise 42 L/min, intermittent	SRaw ↑100%	Roger et al., 1985
0.5 ppm	3 min x 3	8	23 °C, 82% RH, exercise (hyperventilating) intermittent	SRaw ↑104% (1st) SRaw ↑35% (2nd) SRaw ↑30% (3rd)	Sheppard et al., 1983
0.6 ppm	5 min	22	21 °C, 20% RH, exercise 50 L/min	SRaw ↑206% SRaw ↑157%	Linn et al., 1985

Concentration	Duration	Subjects	Exposure Parameters	Effect	Reference
			21 °C, 80% RH, exercise 50 L/min 38 °C, 20% RH, exercise 50 L/min 38 °C, 80% RH, exercise 50 L/min,	SRaw ↑89% SRaw ↑39%	
0.6 ppm	5 min	23	23 °C, 85% RH, exercise 48 L/min	SRaw ↑120% $V_{max25-75}$ ↓26% FEV <sub>1</sub> ↓13%	Linn et al., 1983b
0.75 ppm	3 h	17	22 °C, 85% RH, exercise 45 L/min (first 10-min of exposure)	Sraw ↓: 322% (at 10-min) 233% (at 20-min) 26% (at 1-hr) 5% (at 2-hr) FEV <sub>1</sub> : ↓20% (at 15-min)	Hackney et al., 1984
0.75 ppm	10 min	23	23 °C, 90% RH, exercise 40 L/min Facemask Mouthpiece	SRaw ↑186% SRaw ↑321%	Linn et al., 1983a
0.75 ppm	10-40 min	10	23 °C, 70% RH, exercise 35 L/min	SRaw ↑150% FEF ↓22% FEV <sub>1</sub> ↓8%	Schacter et al., 1984
1.0 ppm	10-40 min	10	23 °C, 70% RH, exercise 35 L/min	SRaw ↑470% FEF ↓27% FEV <sub>1</sub> ↓14%	Schacter et al., 1984
1.0 ppm	75 min	28	26 °C, 70% RH, exercise 42 L/min, intermittent	SRaw ↑300%	Roger et al., 1985
1.0 ppm	30 min	10	26 °C, 70% RH, exercise 41 L/min (3- 10 min periods separated by rests of 15 min)	SRaw ↑172% SRaw ↑137% SRaw 106%	Kehrl et al., 1987
1.0 ppm	30 min	10	26 °C, 70% RH, continuous exercise 41 L/min	SRaw ↑233%	Kehrl et al., 1987
1.0 ppm	1 min 3 min 5 min	8	22 °C, 75% RH, exercise 60 L/min	SRaw ↑93% SRaw ↑395% SRaw ↑580%	Balmes et al., 1987
1.0 ppm	0.5 min 1.0 min 2.0 min 5.0 min	12	20 °C, 40% RH, exercise 40 L/min	No SRaw effect No SRaw effect SRaw ↑121% SRaw ↑307%	Horstman et al., 1988

Fuente: Adaptado de USEPA, 1994

**Tabla 50. Guía para exposición aguda de SO<sub>2</sub> (AEGL-2)**

**ACUTE EXPOSURE GUIDELINES FOR SULFUR DIOXIDE  
(CAS NO. 7446-09-5)**

AEGL-2 VALUES				
10 min	30 min	1 h	4 h	8 h
0.75 ppm	0.75 ppm	0.75 ppm	0.75 ppm	0.75 ppm
Weight-of-evidence approach suggests 0.75 ppm induced moderate bronchoconstriction in exercising asthmatics.				
Time Scaling: The role of exposure duration to the magnitude of SO <sub>2</sub> -induced bronchoconstriction in asthmatics appears to decrease with extended exposure. Data suggest that a major portion of the SO <sub>2</sub> -induced bronchoconstriction occurs within 10-minutes and increases minimally or resolves beyond 10-minutes of exposure. Therefore, AEGL-2 values for SO <sub>2</sub> were held constant across all time points.				
Data adequacy: Robust data base of controlled studies in both healthy and asthmatic humans.				

0.75 ppm= 1950 (µg/m<sup>3</sup>) de SO<sub>2</sub>

**Tabla 51. Peso de evidencia para AEGL-2**

WEIGHT- OF EVIDENCE FOR AEGL-2					
0.75 ppm 1950 (µg/m <sup>3</sup> )	3 h	17	22° C , 85% RH, exercise 45 L/min (first 10-min of exposure)	SRaw ↑ 322% (at 10-min) 233% (at 20-min) 26% (at 1 -hr) 5% (at 2-hr) FEV1: ↓ 20% (at 15-min)	Hackney et al., 1984
0.75 ppm 1950 (µg/m <sup>3</sup> )	10-40 min.	10	23 °C, 70% RH, exercise 35 L/min	SRaw ↑ 150% FEF ↓ 22% FEV1 ↓ 8%	Schacter et al., 1984
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	10-40 min.	10	23° C, 70% RH, Exercise 35 L/min.	SRaw ↑ 470% FEF ↓ 27% FEV1 ↓ 14%	Schacter et al., 1984
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	75 min.	28	26° C, 70% RH, exercise 42 L/min intermittent	SRaw ↑ 300%	Roger et al., 1985
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	30 min.	10	26 °C, 70% RH, exercise 41 L/min (3-10 min periods separated by rest of 15 min)	SRaw ↑ 172% SRaw ↑ 137% SRaw 106%	Kehrl et al., 1987
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	30 min.	10	26 ° C, 70% RH, Continuous exercise 41 L/min	SRaw ↑ 233%	Kehrl et al., 1987
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	1 min 3 min 5 min	8	22 °C, 75% RH, Exercise 60 L/min	SRaw ↑ 93% SRaw ↑ 395% SRaw ↑ 580%	Balmes et al., 1987
1.0 ppm 2620 (µg/m <sup>3</sup> )	0.5 1.0 2.0 5.0	12	20 °C, 40% RH, exercise 40 L/min	No SRaw effect No Sraw effect Sraw ↑ 121% SRaw ↑ 307%	Horsman et al., 1988

## Aplicación de los AEGLs

Los riesgos en la salud pueden estimarse por estimación de exposición y riesgo usando la metodología USEPA. Los territorios en estudio fueron divididos en zona urbana y zona rural. Las zonas urbanas son las más cercanas a las fuentes primarias de emisiones aéreas, y donde típicamente la población es más numerosa y densa. La ubicación de estas poblaciones las hace más vulnerable a los efectos de las emisiones y por tanto se seleccionó una estrategia de muestreo intencional para la localización de las estaciones de monitoreo y recolección de muestras aéreas. Por lo tanto, los puntos de muestreo se seleccionan en la zona urbana de acuerdo a la presencia de residencias e instituciones públicas, tales como consultorios de salud, hogar de ancianos, y escuela. Para los efectos de la caracterización de exposición y riesgo se utilizaron datos de análisis ambiental, no provenientes de resultados de modelaciones.

### Exposición

Se entiende por dosis de exposición por inhalación de gases a una estimación del ingreso de la sustancia exógena que ocurre por un período de tiempo por la vía respiratoria. En el caso del  $\text{SO}_2$ , este tiempo está definido por la aparición de vasoconstricción bronquial en las vías respiratorias altas, proceso que tiene lugar alrededor de los primeros tres minutos siguientes al comienzo de la exposición al  $\text{SO}_2$ . Típicamente, una exposición por inhalación cubre desde horas a días.

En nuestra revisión no identificamos ningún artículo que describiera un procedimiento para el cálculo de la dosis de  $\text{SO}_2$  por inhalación. Esto no es sorprendente, ya que:

- la USEPA ha discontinuado la metodología que usaba frecuencia respiratoria,
- puesto que no hay un criterio de toxicidad para el  $\text{SO}_2$  (RfC), esto apoya el cambio de metodología de la USEPA;
- estimación de una dosis por inhalación cuyo tiempo de exposición duraría 5 a 10 minutos, sería difícil e inexacto;
- en un principio la retención del  $\text{SO}_2$  es alta, pero luego comienza a disminuir debido a la broncoconstricción, lo que hace difícil estimar la dosis por inhalación

En el caso del  $\text{SO}_2$  se lleva a cabo por comparación directa de la concentración aérea y la duración del peak de  $\text{SO}_2$  haciendo uso de los AEGLs. En un primer análisis, se identifican los peaks de  $\text{SO}_2$  que exceden los AEGL-1 de 200 ppb ( $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y en un segundo análisis se buscan peaks que excedieran un AEGL-2 de 750 ppb ( $1950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Los resultados de los valores de  $\text{SO}_2$  observados en el monitoreo, fueron graficados a lo largo del tiempo y las concentraciones correspondientes.

Para el SO<sub>2</sub>, la metodología AEGL mide el tiempo de aparición de efectos específicos para una concentración determinada de SO<sub>2</sub> en el aire. La aparición de broncoconstricción define el NOEL<sup>51</sup>.

Igualmente, la frecuencia y duración de la exposición de la población expuesta a SO<sub>2</sub> presentes en las zonas industriales priorizadas están determinadas por los tiempos de aplicación del SO<sub>2</sub>. En cuanto a los factores humanos de exposición, solamente la frecuencia respiratoria depende del nivel de actividad física (reposo, practicando reposo). Los demás factores (peso corpóreo, ingesta de agua o alimentos, superficie corpórea, etc.) no tienen relación. Los factores de exposición humana para la inhalación no se aplican al concepto AEGL.

La dosis inhalada es difícil de determinar comparada con otras rutas de exposición. En inhalación, la *dosis aplicada* depende de la concentración de exposición, tamaño de la partícula, y patrones de respiración, entre otros factores:

- Relación entre exposición personal y concentración ambiental.
- Concentración de SO<sub>2</sub> al interior y exterior de viviendas
- Errores de exposición en estudios epidemiológicos

### Dosis por inhalación

El método tradicional usado para estimar dosis por inhalación de una sustancia es calcular la masa del agente en el aire inspirado y la exposición total dosis<sup>52</sup>,

$$\text{Dosis } (\mu\text{g}/\text{día}) = \tilde{V}_E \text{ (m}^3/\text{día)} \times \text{Cair } (\mu\text{g}/\text{m}^3)$$

donde  $\tilde{V}_E$  es ventilación minuto expresado como volumen total de aire inspirado en un día y Cair es la concentración de la sustancia peligrosa en el aire inspirado. Este enfoque requiere múltiples supuestos, los más críticos siendo aquellos relacionados con la toxicocinética incluyendo cantidad absorbida, características de distribución, metabolismo y excreción.

La dosis total se puede normalizar por peso corpóreo con el fin de establecer dosis-respuesta y extrapolación entre especies:

$$\text{Dosis normalizada } (\mu\text{g}/\text{kg}\cdot\text{día}) = \text{Dosis } (\mu\text{g}/\text{día}) / \text{Peso corpóreo (kg)}$$

La dosis estimada de SO<sub>2</sub> está sujeta a múltiples incertidumbres, entre otras: la ventilación minuto ( $\tilde{V}_E$ , m<sup>3</sup>/día) está expresada en metros cúbicos por día, pero la exposición efectiva ocurre en los tres primeros minutos de exposición, es decir, en alrededor de 1/480 de la exposición diaria. La concentración del SO<sub>2</sub> es inferida de las

<sup>51</sup> NOEL = No-observed-effect-level, es decir, la relación concentración-tiempo para la cual presencia de SO<sub>2</sub> aéreo no es discapacitante.

<sup>52</sup> Methods for Derivation of Inhalation Reference Concentrations and Applications of Inhalation Dosimetry (USEPA, 1994).

mediciones del sistema de monitoreo, y la precisión y exactitud de estas concentraciones.

### Estimación de la concentración, caso de estudio

Un detalle de los peaks identificados durante mayo y junio 2011 en el estudio Emisiones en Concón, Quintero y Puchuncaví<sup>53</sup> se muestra en Figura 129 y Figura 130, abajo. En estas figuras, los peaks han sido ampliados, y permiten mostrar que el valor máximo está levemente por debajo de 300 ppb, y que la duración del peak fue significativamente más corto que 8 horas en ambos casos.

Los niveles de SO<sub>2</sub> superaron ligeramente el nivel 200 ppb = 0,20 ppm = 520 µg/m<sup>3</sup> en varias ocasiones. Estos niveles corresponden a AEGL1, que representan umbrales de exposición no discapacitante para el público en general y son aplicables para períodos de emergencia que van desde 10 minutos a 8 horas de exposición. Además hubo niveles medidos en aire que están por bajo los 750 ppb = 0,75 ppm = 1950 µg/m<sup>3</sup> correspondientes a un AEGL-2, y que representan un umbral de exposición considerado discapacitante para un asmático durante ejercicio.

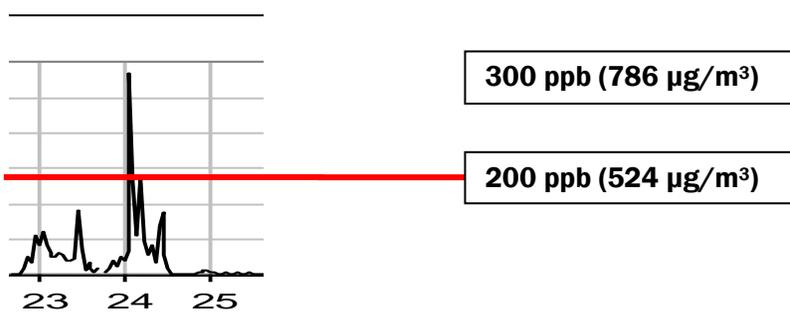


Figura 129. Ejemplo de valores horarios de SO<sub>2</sub>, entre el 23 y 25 de mayo de 2011

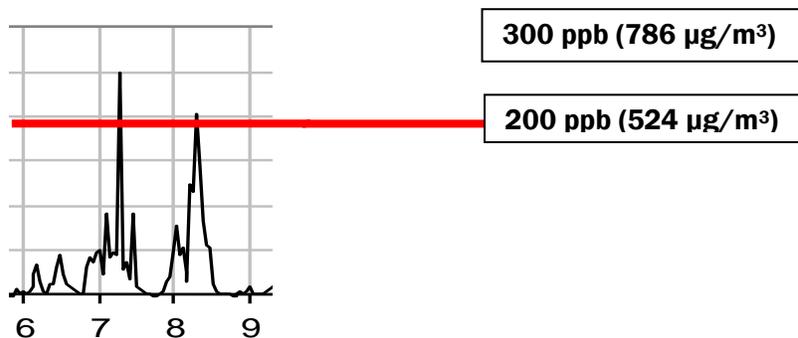


Figura 130. Ejemplo de valores horarios de SO<sub>2</sub>, entre el 6 y 8 junio de 2011

<sup>53</sup> “Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas Concón, Quintero y Puchuncaví”. (licitación 608897-124-LP11). Subsecretaría del Medio Ambiente, abril 2013.

Los dos únicos peaks registrados en el período de observación son más breves y de intensidad menor que un nivel AEGL-2 de SO<sub>2</sub> discapacitante para un asmático.

La incertidumbre asociada con las mediciones y los riesgos en la salud se relaciona con la ubicación de la estación de monitoreo, la distancia entre las fuentes y la estación de monitoreo, y la ubicación de los receptores en relación con la estación de medición. Estos factores son críticos para establecer una asociación

Un resumen de los hallazgos más significativos del estudio citado, se presentan en la Tabla 42.

**Tabla 52. Episodios en que los niveles de SO<sub>2</sub> detectados superaron el AEGL-2, medidos por la Red Codelco/Gener**

	[SO <sub>2</sub> ] excede <b>AEGL-1</b> (200 ppb = 520 µg/m <sup>3</sup> )	[SO <sub>2</sub> ] excede <b>AEGL-2</b> (750 ppb = 1950 µg/m <sup>3</sup> )		
		fecha	Concentración mg/m <sup>3</sup>	Hora (24 horas)
Estación La Greda	Numerosas ocasiones entre enero- noviembre 2012	febrero 5	1.99	17:51
		marzo 2	1.98	12:38
		abril 5	4.63	18:50
		junio 4	3.85	19:00
		junio 4	3.74	18:59
		agosto 12	2.96	12:13
		diciembre 2	2.45	08:40
		diciembre 2	2.49	08:39
Estación Los Maitenes	Frecuentemente excedido entre enero-diciembre 2012	febrero 1	3.04	09:23
		septiembre 19	<b>5.91</b>	09:41
		noviembre 12	<b>5.71</b>	15:39
Estación Quintero AES	<b>Frecuentemente excedido entre enero-diciembre 2012</b>	marzo 17	2.05	<b>23:34</b>
		marzo 18	2.04	<b>01:21</b>
		marzo 19	2.01-3.77	<b>01:33-02:15</b>
			3.77	<b>01:57</b>
		abril 28	2.45 -4.22	<b>06:31-06:38</b>
		mayo 24	2.07 -5.30	<b>01:41-01:53</b>
		julio 8	2.08-2.25	<b>4:37-4:39</b>
		julio 21	2.3-2.93	<b>23:10-23:25</b>
		agosto 4	2.04-3.83	<b>01:41-02:52</b>
		agosto 26	2.11-4.79	<b>00:35-00:56</b>
		septiembre 20	2.03-5.72	<b>06:15-06:23</b>
		octubre 3	2.03-3.75	<b>07:05-07:13</b>

**Tabla 53. Estaciones donde AEGL-1 < SO<sub>2</sub> < AEGL-2**

	[SO <sub>2</sub> ] excede AEGL-1 (200 ppb = 520 µg/m <sup>3</sup> )	[SO <sub>2</sub> ] excede AEGL-2 (750 ppb = 1950 µg/m <sup>3</sup> )		
		fecha	hora	concentración
<b>Estaciones CENMA</b>				
Consultorio Concón	Numerosas ocasiones entre marzo-diciembre 2012	---		
Hogar Ancianos Ventana	Numerosas ocasiones entre marzo-diciembre 2012	---		
Nueva Escuela La Greda	Excedido en 7 ocasiones	---		
<b>RED ENAP</b>				
Estación Concón	Una ocasión entre enero-noviembre 2012	---		
Estación Colmo	---	---		
Estación Quintero GNL	Numerosas ocasiones entre enero- noviembre 2012	---		
<b>RED Codelco/Gener</b>				
Estación Puchuncaví	---	---		
Estación Sur	Frecuentemente excedido entre enero-diciembre 2012	---		
Estación Valle Alegre	---			

En este estudio se encontró que los puntos más afectados por la presencia de SO<sub>2</sub> se ubican en las inmediaciones de las estaciones La Greda, Los Maitenes, y Quintero AES. Los niveles detectados excedieron el nivel AEGL-2 de 0,75 ppm = 1950 µg/m<sup>3</sup> considerado discapacitante para la población general, incluyendo receptores susceptibles tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades. La concentración mayor de SO<sub>2</sub> fue de 5910 µg/m<sup>3</sup>, el 19 septiembre 2012, detectada en la estación Los Maitenes.

El asma bronquial aparece como causa de muerte en alrededor de 200 a 250 casos por año en Chile, las cuales también se concentran en los grupos de mayor edad, aunque no tan marcadamente como las por limitación crónica de flujo aéreo. Un 55% de las muertes por asma bronquial se producen en los mayores de 65 años.

El SO<sub>2</sub> fue identificado como un contaminante aéreo que es un subproducto de las operaciones de numerosas plantas industriales en la zona de estudio C-Q-P (Cóncon, Quintero y Puchuncaví) y que es considerado peligroso para la salud humana, debido a la propiedad broncoconstrictora en particular en asmáticos.

- Severidad y duración de los episodios en el caso de estudio: Los AEGLs fueron desarrollados como valores de referencia para su uso para los casos de emisiones aéreas de corto plazo. Los niveles de SO<sub>2</sub> detectados en las estaciones La Greda, Los Maitenes, y Quintero AES de la red Codelco/Gener, excedieron los niveles AEGL-2, (1950 µg/m<sup>3</sup>) entre febrero y diciembre 2012, los

cuales son considerados discapacitantes de la función respiratoria, y asociados con broncoconstricción en asmáticos. En la estación Los Maitenes los niveles excedieron el valor  $1950 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en tres oportunidades, con  $5910$  (19 septiembre 2012),  $5710$  y  $2970 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la estación La Greda los niveles de  $\text{SO}_2$  excedieron el AEGL-2 en seis episodios, llegando hasta  $4630 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En la estación Quintero AES los niveles fueron excedidos en 10 episodios, con máximos de  $5300$  y  $5720 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Las estaciones de monitoreo CENMA de Concón detectaron frecuentes peaks entre  $200 \text{ ppb} = 0,20 \text{ ppm} = 520 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y hasta  $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; en la estación Ventana los peaks fueron menos frecuentes y menos severos, y en la estación Nueva Escuela La Greda, los peaks fueron de menor intensidad y menos frecuentes.

- Hora de los episodios y dirección predominante de los vientos: Durante los meses del monitoreo (febrero a diciembre 2012) se observaron dos tendencias notoriamente diferentes en cuanto al lugar y duración de los episodios de altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  en el aire, que están relacionados con la dirección de los vientos predominantes.

Los episodios de altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  se registraron en la estación La Greda entre las 08:39 y las 19:00 horas, es decir, de día y durante las horas de actividades escolares. Esta estación se encuentra ubicada frente a la escuela La Greda, y por lo tanto las mediciones de  $\text{SO}_2$  son relevantes en cuanto a la exposición y riesgos para la salud de los niños de la escuela. La estación Los Maitenes presentó igual altas concentraciones durante las horas de 09:23 y 15:39.

La estación de monitoreo Quintero AES presentó frecuentes episodios de altos niveles de  $\text{SO}_2$  atmosféricos, que fueron detectados en las horas nocturnas, entre las 23:00 y 07:00 horas. Los episodios nocturnos se caracterizaron por presentar numerosos y frecuentes peaks durante episodios relativamente de corta duración.

Los niveles detectados en las estaciones CENMA de Consultorio Concón, Hogar Ancianos Ventana, las estaciones de la red ENAP, y las restantes de la red Codelco/Gener, presentaron frecuentes episodios de niveles que exceden los valores AEGL-1 ( $200 \text{ ppb} = 520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) considerados de efectos potenciales en la salud.

Los niveles permanentes de  $\text{SO}_2$  promediaron  $202 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación CENMA Ventana,  $211 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en CENMA Concón, y  $205 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación CENMA Nueva Escuela La Greda, entre abril-diciembre, es decir, son similares. Estos niveles son significativamente inferiores al nivel AEGL-1 de referencia, AEGL-1 =  $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y por lo tanto no se espera contribuyan a los efectos en la salud. Sin embargo, tal como se hizo notar más arriba, las poblaciones de Puchuncaví, La Greda y Nueva Escuela La Greda están afectadas por los vientos diurnos

provenientes del Suroeste, y la población de Quintero y Quintero GNL están afectados por los vientos nocturnos provenientes del Noreste.

Las concentraciones máximas detectadas están por sobre las cuales se predice que en la población general, incluyendo personas susceptibles, incluyendo individuos sujetos a respuestas únicas o idiosincráticas tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades, pueden experimentar efectos adversos en la salud que son irreversibles o serios, de larga duración o un deterioro en la habilidad para escapar, inclusive a concentraciones por debajo de cada AEGL respectivo. Las concentraciones detectadas apoyan la necesidad de conducir evaluaciones médicas para determinar los efectos en la salud por el SO<sub>2</sub>.

### Caracterización del riesgo

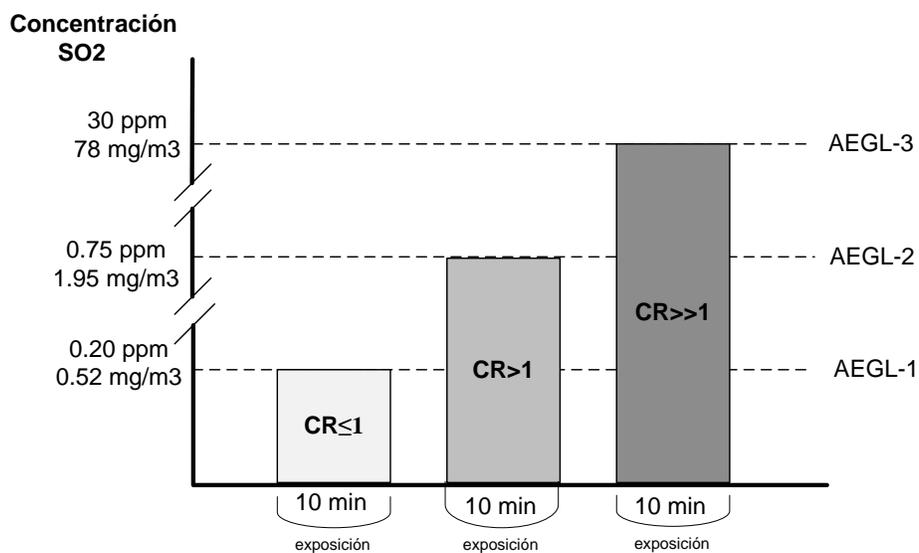
En toxicología aguda, los cocientes de riesgo (CR) se calculan por comparación de la concentración observada para el contaminante no cancerígeno y su respectivo límite de exposición desarrollado por autoridades científicas o regulatorias. En general,

$$CR = \frac{[\text{Concentración calculada } (\mu\text{g}/\text{m}^3)]}{[\text{Concentración de referencia } (\mu\text{g}/\text{m}^3)]}$$

Durante la investigación bibliográfica presente, se identificaron sobre mil publicaciones, pero para el SO<sub>2</sub> no se encontró metodología alguna para el cálculo de un cociente de riesgo similar al cálculo del cociente de peligro (hazard quotient, HQ).

Interpretación del CR:

- **CR ≤ 1.0** Indica que la exposición estimada es menor o igual que la exposición límite, es decir, el nivel inocuo supuesto de exposición. Los CRs menores o iguales a 1 están asociados con bajos riesgos a la salud, aun en individuos sensibles dados el nivel de conservatismo incorporado en la derivación de la exposición límite y de las estimaciones de riesgo.
- **CR > 1.0** Indica que la estimación de exposición excede la exposición límite. Esto sugiere un moderado nivel de riesgo, cuya consecuencia debe ser balanceada contra el grado de conservatismo incorporada en la estimación de riesgo.
- **CR >> 1.0** Indica que la estimación de exposición excede la exposición límite. Esto sugiere un elevado nivel de riesgo, el que debe evitarse o prevenir.



**Figura 131. Representación de los cocientes de riesgo para receptores expuestos a tres concentraciones de SO<sub>2</sub> en aire. Un AEGL-1 ≤ 0,52 mg/m<sup>3</sup> es un supuesto nivel inocuo de exposición y para una exposición de 10 minutos corresponde a un cociente de riesgo CR ≤ 1. Mientras la exposición ocurra a niveles de SO<sub>2</sub> AEGL ≤ 0,52 mg/m<sup>3</sup>, el riesgo no va a sobrepasar el CR ≤ 1.**

$$0,52 \text{ mg/m}^3 = 520 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

$$1,95 \text{ mg/m}^3 = 1950 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

$$78 \text{ mg/m}^3 = 78000 \text{ } \mu\text{g/m}^3$$

## 5. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS REGULATORIOS

### 5.1. Criterios para revisar las normas ambientales

El Reglamento para la dictación de Normas de calidad ambiental y de emisión, D.S. 38 del año 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, en su Artículo 39, indica que para revisar las normas ambientales se debe considerar criterios de eficacia y de eficiencia en su aplicación, ponderados de acuerdo a:

- a) Los antecedentes considerados para la determinación de la norma de conformidad con lo dispuesto en el artículo 26, 28 inciso 1°, 32 inciso 1° y 37 letra a) del citado Reglamento; que tienen que ver con actualizaciones de los antecedentes que tienen para establecer los estándares.
- b) El nivel de cumplimiento informado por la Superintendencia del Medio Ambiente y vigencia actual de los objetivos tenidos en cuenta al momento de su dictación;
- c) Los cambios en las condiciones ambientales consideradas al momento de dictarse la norma, y
- d) Los resultados de las investigaciones científicas que aporten antecedentes nuevos sobre efectos adversos a las personas o a los recursos naturales o sobre nuevas metodologías de medición.

De esta forma, se puede decir que:

- e) Hay evidencia científica suficiente que indica que los estándares establecidos para el SO<sub>2</sub> de 24 horas y anual, presentan una amplia tolerancia, respecto a las recomendaciones y guías internacionales. En otras palabras, el objetivo preventivo del decreto supremo N°113, no se condice con los niveles que se establecen en los estándares.
- f) Los nuevos antecedentes disponibles desde el 2005, abunda en focalizar la vigilancia sobre los efectos agudos en salud del SO<sub>2</sub>.
- g) Hay evidencia en el país, en zonas industriales que comparten territorio con asentamientos humanos, que la norma de SO<sub>2</sub>, no protege a las poblaciones más vulnerables, correspondiente a grupos de asmáticos, infantes y niños.
- h) El decreto supremo N°113, mantiene un estándar anual del año 1978, cuenta con un estándar de 24 horas del año 2003; y no incluye un estándar para la protección de los efectos agudos para exposiciones de una hora o menos.

- i) Los niveles que se establecen para decretar emergencia y que tienen por objeto reducir la exposición de los grupos vulnerables de la población, presentan una amplia tolerancia respecto al riesgo al cual se expone la población.

Por lo expuesto, se requiere contar con antecedentes técnicos y de evaluación social para revisar la norma primaria de calidad del aire de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), establecida en el D.S. N°113, del 2003, del MINSEGRES.

La evaluación de escenarios regulatorios considera tres aspectos metodológicos. El primero corresponde a comparaciones de concentraciones de dióxido de azufre con tres escenarios regulatorios, que incluyen una evaluación en resoluciones temporales horarias, diarias y anuales. El segundo aspecto corresponde a una evaluación de riesgo en las zonas de estudio. El tercer aspecto corresponde a una evaluación económica y social. Cada uno de estos tres aspectos se presentan de forma separada en este capítulo.

## 5.2. Evaluación de escenarios normativos

### 5.2.1. Metodología

El estudio considera la evaluación de escenarios normativos a diferentes resoluciones temporales (horaria, diaria y anual) considerando normativas internacionales (ver Tabla 54). Esta evaluación se realizó considerando el peor escenario por cada zona del estudio. Para esto se seleccionaron una o dos estaciones por zona utilizando como criterio de selección los mayores valores históricos del percentil 99<sup>54</sup>.

**Tabla 54. SO<sub>2</sub> Normativa Internacional**

Concentración de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> N)			
País	1 hora	24 horas	Anual
México	524	288	66
China (1)	500	150	--
Reino Unido	350	--	--
Comunidad Europea	350	125	--
EEUU	197	--	--
Chile	--	250	80
India	--	80	50
OMS	--	125 (OI1) 50 (OI2)	--

<sup>54</sup> Para zonas de menor extensión geográfica se seleccionó una estación, para zonas más extensas o donde la condición geográfica cambia se seleccionaron dos (como en Huasco donde hay estaciones cercanas al borde costero y otras al interior del valle)

<b>Concentración de SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>N)</b>			
		20	
Perú	--	20	--

Los escenarios evaluados requeridos por el Ministerio del Medio Ambiente son los que se indican a continuación (Tabla 55):

**Tabla 55. Escenarios normativos considerados en el estudio**

<b>Concentración de SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>N)</b>			
<b>1 hora</b>	500	350	197
<b>24 horas</b>	125	50	20
<b>Anual</b>	80	66	Dejar sin efecto el actual estándar actual

A partir de los escenarios normativos considerados se procedió a la elaboración de gráficos que dieran cuenta de la situación de superación de cada uno de los niveles de SO<sub>2</sub>.

Los gráficos muestran los promedios de concentraciones de SO<sub>2</sub> en 3 resoluciones temporales distintas: horaria (gráficos azules), diaria (gráficos grises) y anual (gráficos naranjos). Cada uno de estos promedios fue comparado con los escenarios propuestos para cada una de las resoluciones. Esto no significa que sea una evaluación de la norma, sino más bien es una comparación de los niveles de SO<sub>2</sub> actuales e históricos con los niveles propuestos como límite.

Por otra parte se realiza un conteo de la cantidad de horas y días que son superados los niveles propuestos anteriormente.

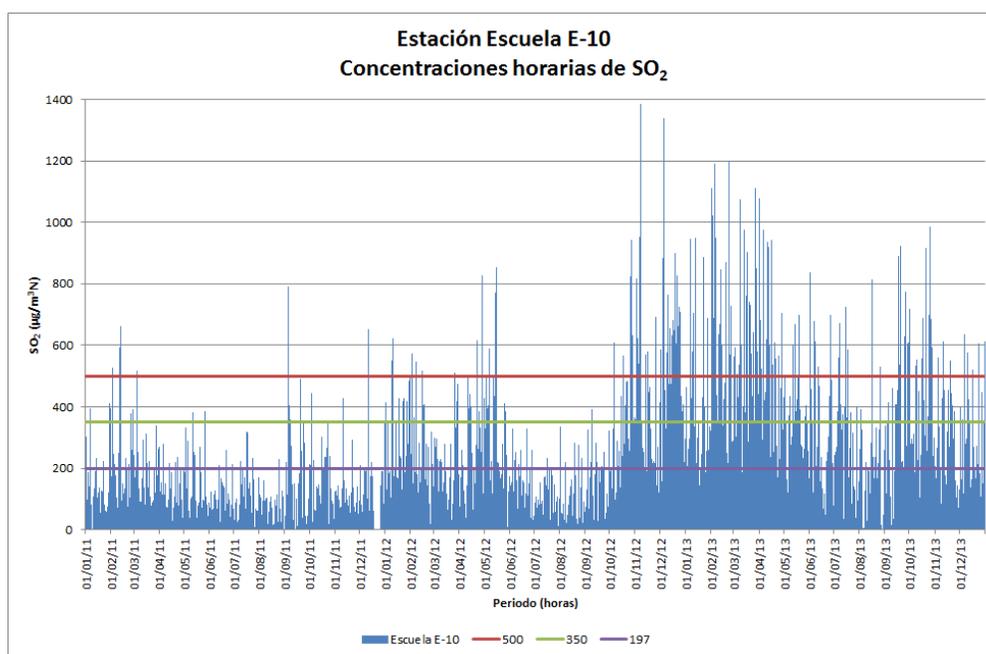
Para el caso de la resolución anual, se calcula el promedio aritmético para cada año, independiente del número de días con datos válidos en dicho año. Idealmente los promedios deben cumplir con el 75% mínimo de información, cuando no cumple se informa con valores de color rojo.

Por último se realizó una comparación de los valores horarios de SO<sub>2</sub> con los niveles de emergencia actualmente vigentes. Esta información se presenta tabulada.

## 5.2.2. Resultados

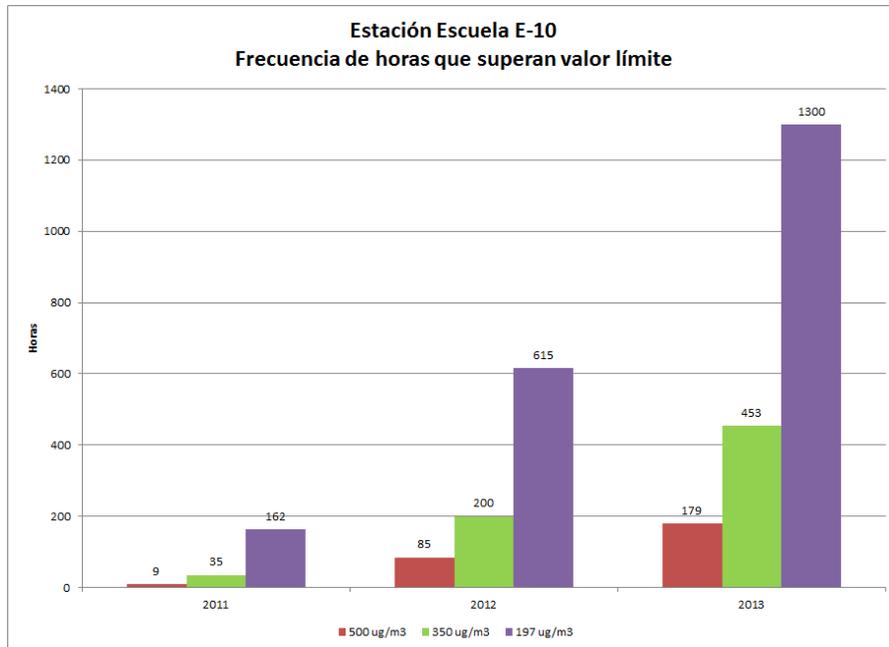
### Situación de superación de niveles de SO<sub>2</sub>, resolución horaria

#### i) Tocopilla



**Figura 132. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla**

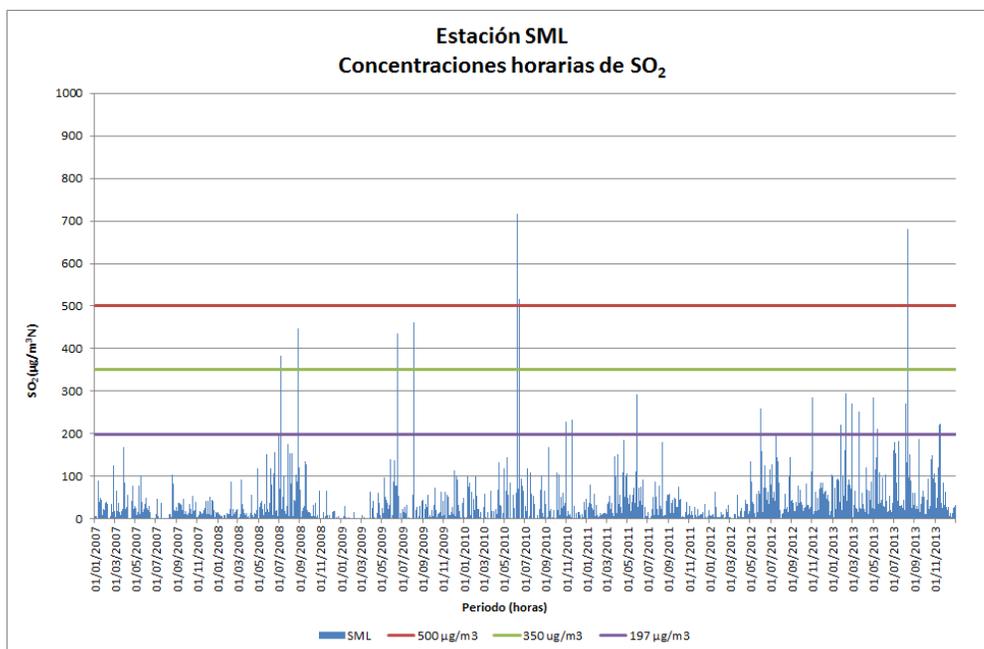
La Figura 132 muestra las concentraciones horarias en la estación Escuela E-10 y los escenarios normativos considerados en el estudio para dicha resolución temporal. Durante el año 2013 se observa la mayor cantidad de superaciones de los valores propuestos.



**Figura 133. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Escuela E-10, Tocopilla**

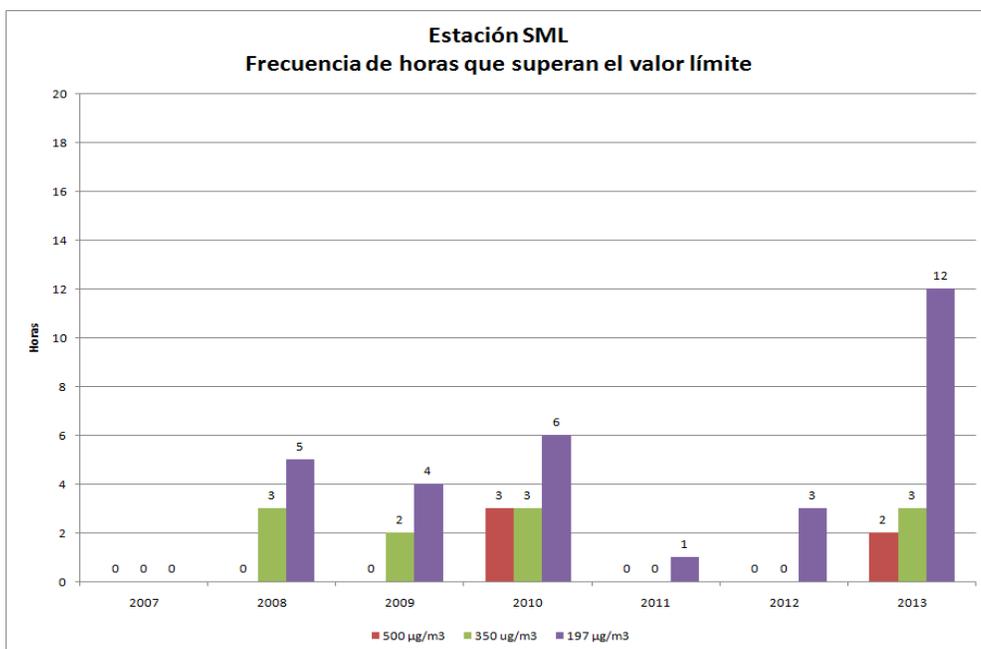
De la figura se puede desprender que durante el año 2013 se registró el mayor número de superaciones para los 3 escenarios considerados. Desde el año 2011 al 2013 se observa una tendencia al aumento en las superaciones. El escenario más estricto es siempre el que presenta mayor número de superaciones.

ii) Calama



**Figura 134. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama**

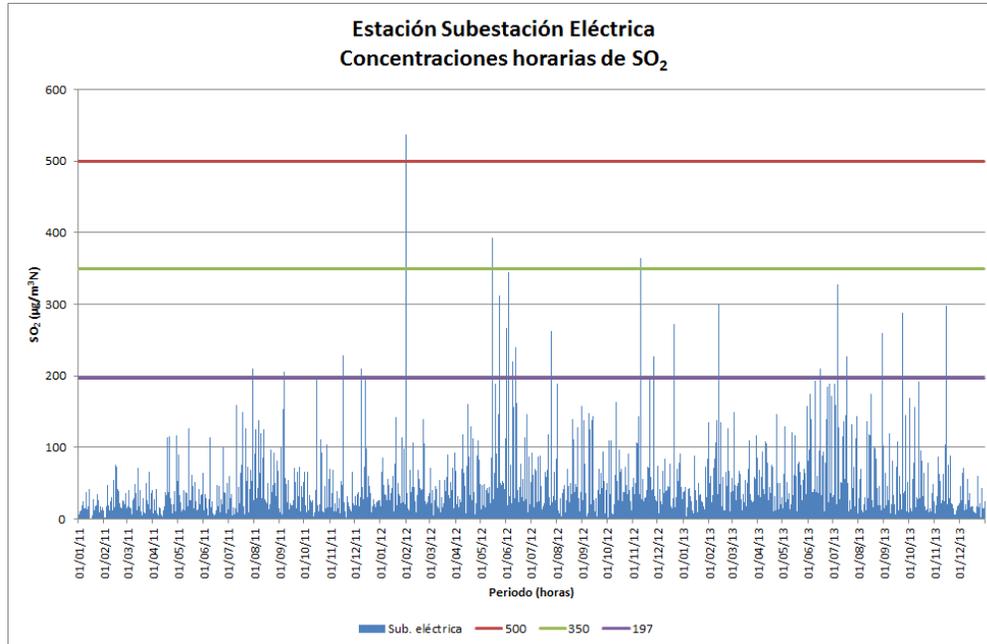
En la Figura 134 se muestran las concentraciones horarias desde el año 2007 hasta el 2013 para la estación SML con los respectivos escenarios regulatorios considerados. Hacia el año 2013 las concentraciones aumentan en magnitud, superando con mayor frecuencia el escenario más estricto propuesto.



**Figura 135. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación SML, Calama**

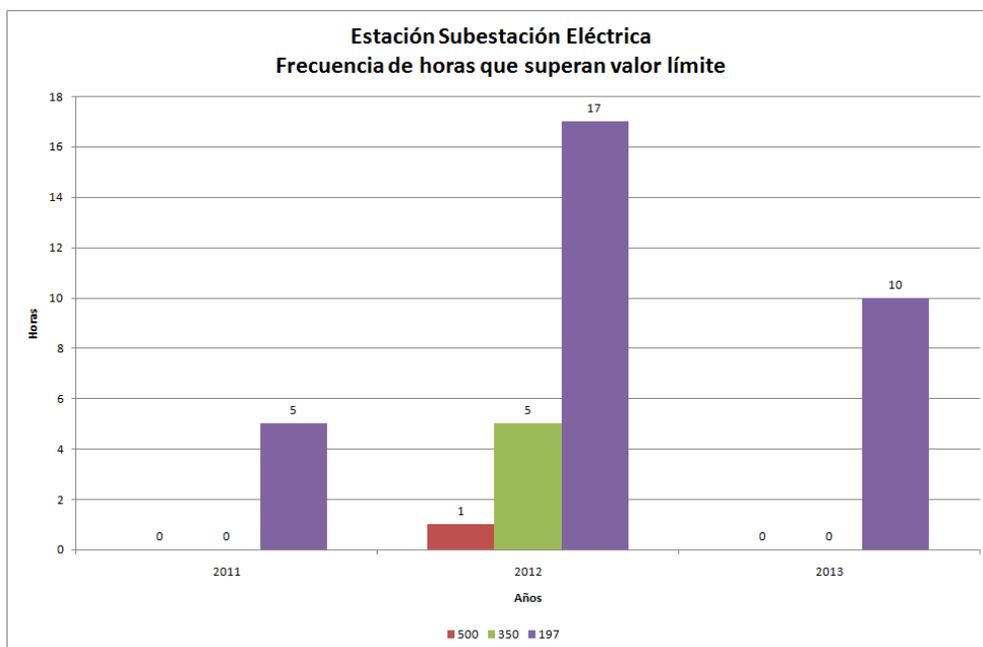
En la Figura 135 puede apreciar que las superaciones de la norma horaria para los 3 escenarios propuestos son escasas. Durante el año 2013 se observa un aumento en el número de horas con superación para la norma de  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en comparación con los años antecesores.

### iii) Mejillones



**Figura 136. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

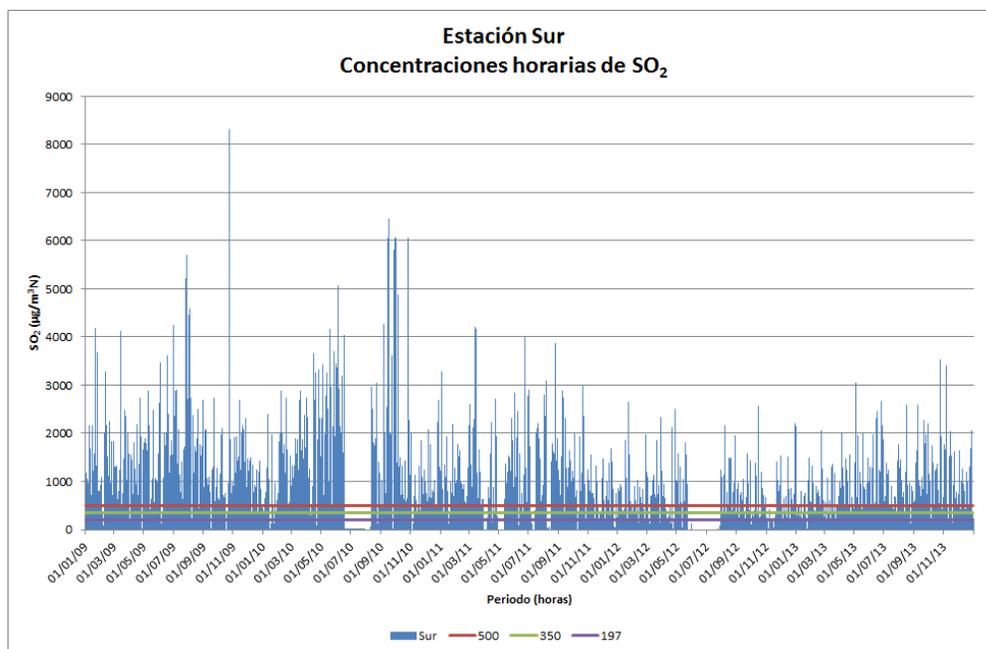
La figura anterior muestra las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> para la estación Subestación Eléctrica en Mejillones, más los escenarios regulatorios propuestos.



**Figura 137. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

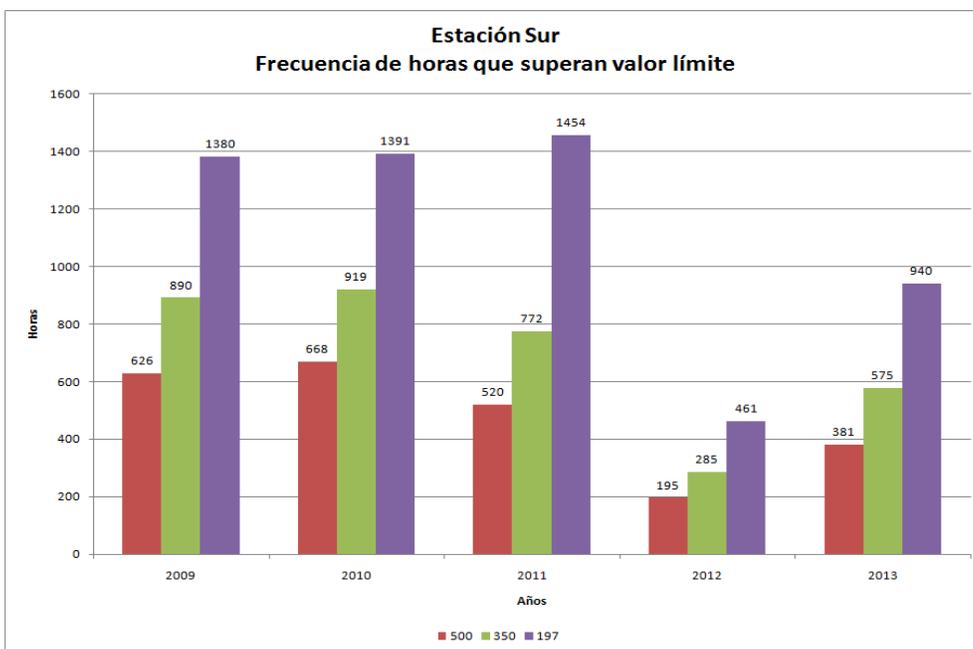
En la Figura 137 se puede apreciar que en Mejillones se supera, prácticamente, solo la norma de 197  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como concentración horaria. En los 3 años analizados sólo se superó una vez la normativa de 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y cinco veces la de 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

iv) Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)



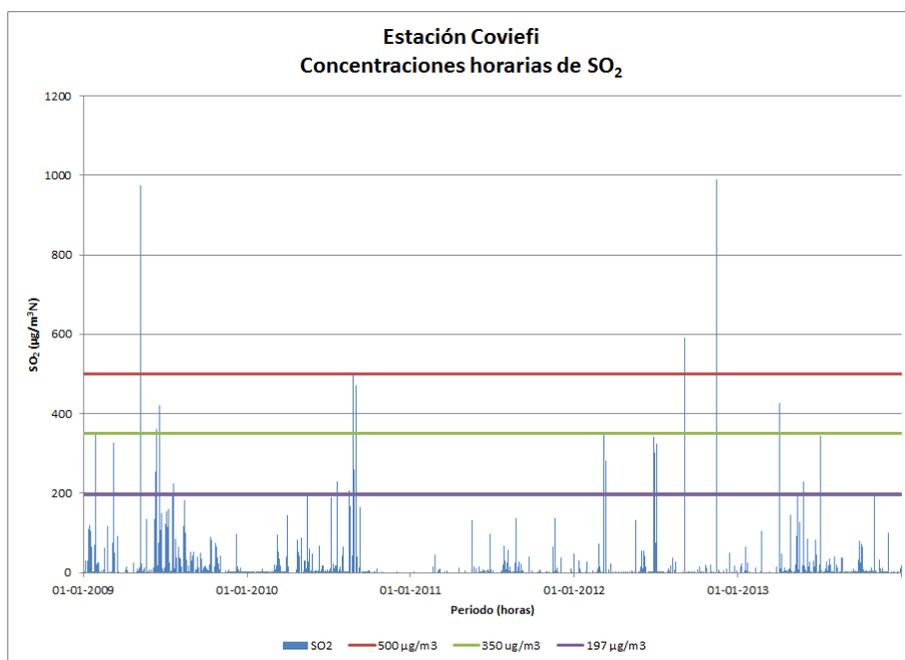
**Figura 138. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, Antofagasta – La Negra**

En la figura se muestran las concentraciones horarias y las normativas regulatorias propuestas para la estación Sur. Se puede apreciar una tendencia a la disminución, en general, en las concentraciones entre los años 2009 y 2013.



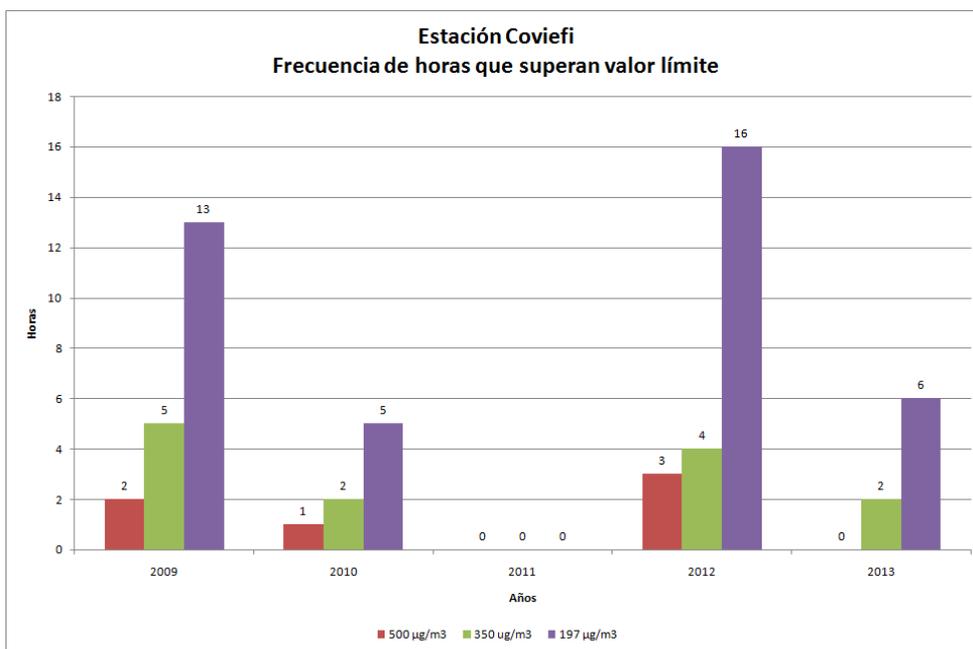
**Figura 139. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Sur, Antofagasta - La Negra**

En la Figura 139 se puede apreciar una disminución importante en las superaciones de norma entre los tres primeros años (2009, 2010 y 2011) y los años 2012 y 2013. El año 2012 presenta el menor número de superaciones para los 3 escenarios propuestos, mientras que 2013 muestra un aumento en el número de superaciones en comparación con 2012, sin embargo, está por debajo de las cifras históricas en los años 2009, 2010 y 2011.



**Figura 140. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta – La Negra**

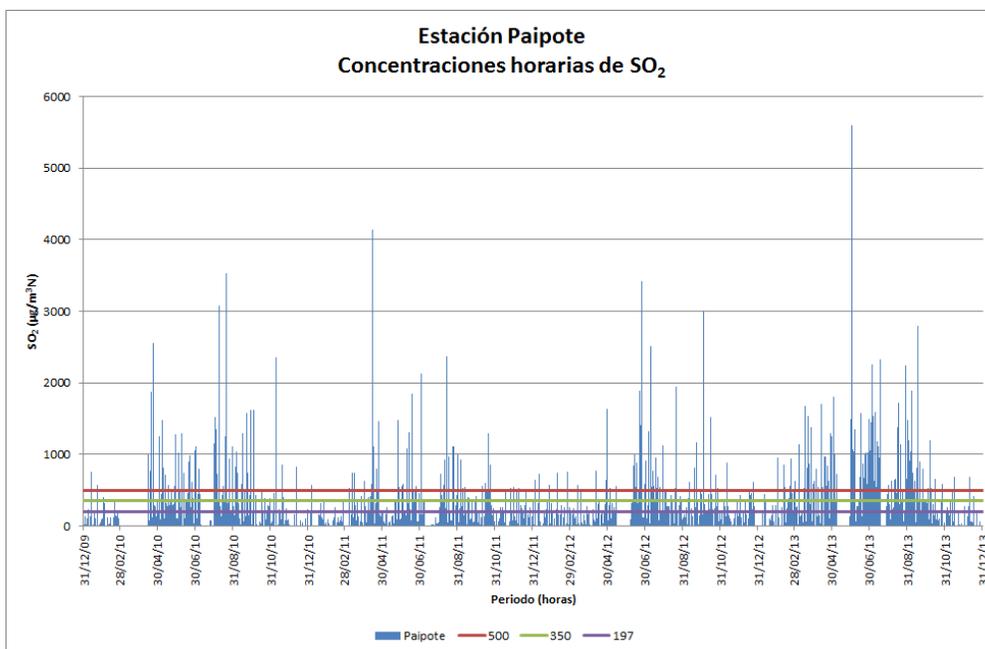
En el gráfico se muestran las concentraciones horarias para la estación Coviefi, se puede apreciar un singular comportamiento, las concentraciones se mantienen en promedio cercanas a cero, no obstante se presentan recurrentes peaks de concentraciones.



**Figura 141. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Coviefi, Antofagasta - La Negra**

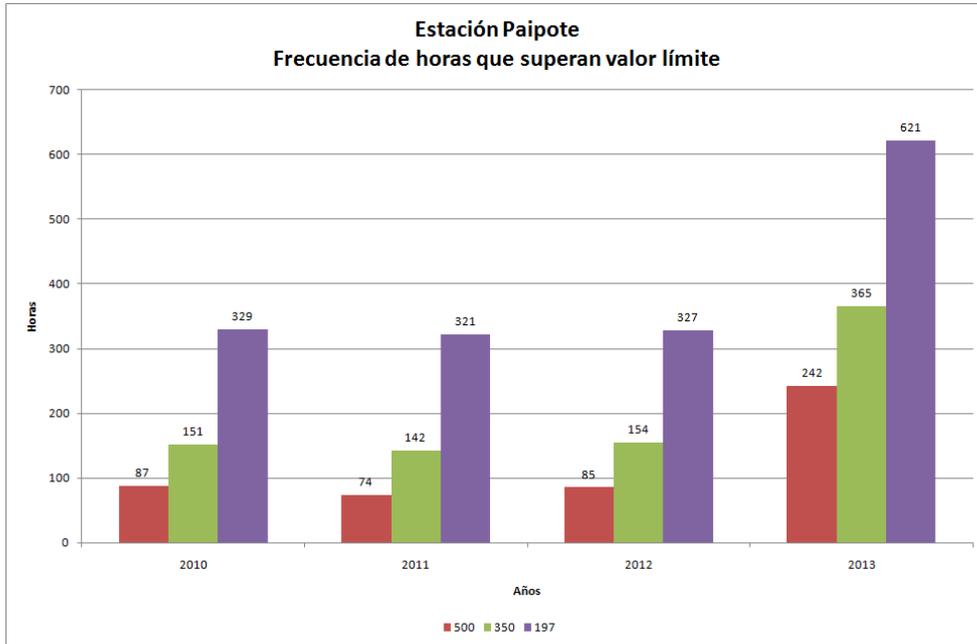
En la Figura 141 se puede apreciar que en la estación Coviefi durante el año 2012 las concentraciones fueron mayores y superaron en mayor medida los niveles regulatorios propuestos. En el año 2013 no se superó la norma de 500 µg/m<sup>3</sup>.

v) Copiapó (Paipote y Tierra Amarilla)



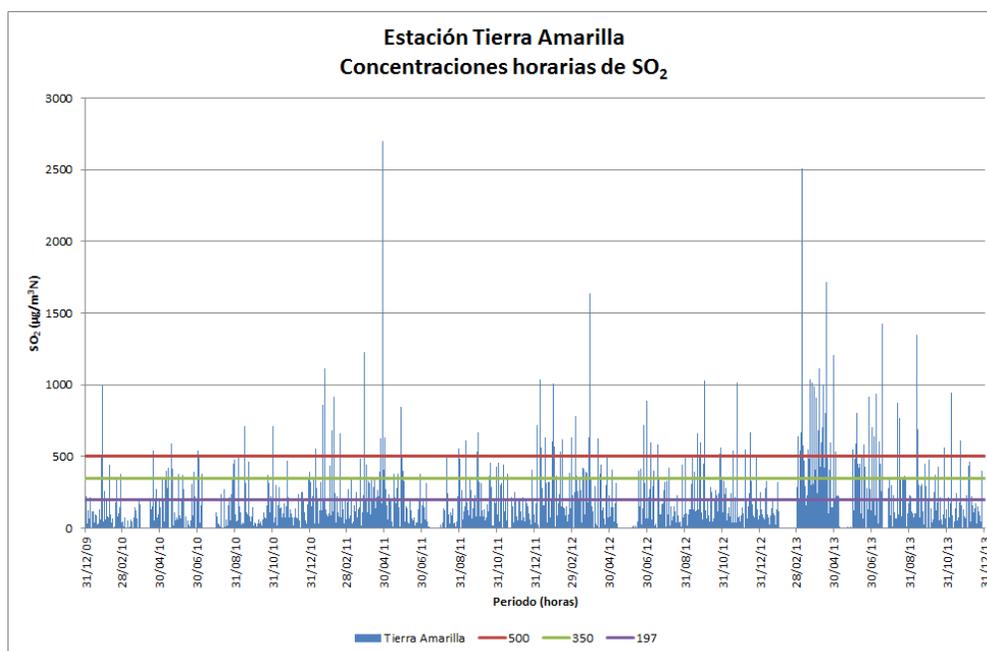
**Figura 142. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Copiapó**

Para la estación Paipote se muestran las concentraciones horarias de  $\text{SO}_2$  y las normas propuestas para evaluación. Se puede observar que durante todos los años los tres escenarios son superados en numerosas oportunidades, con una tendencia positiva en las concentraciones.



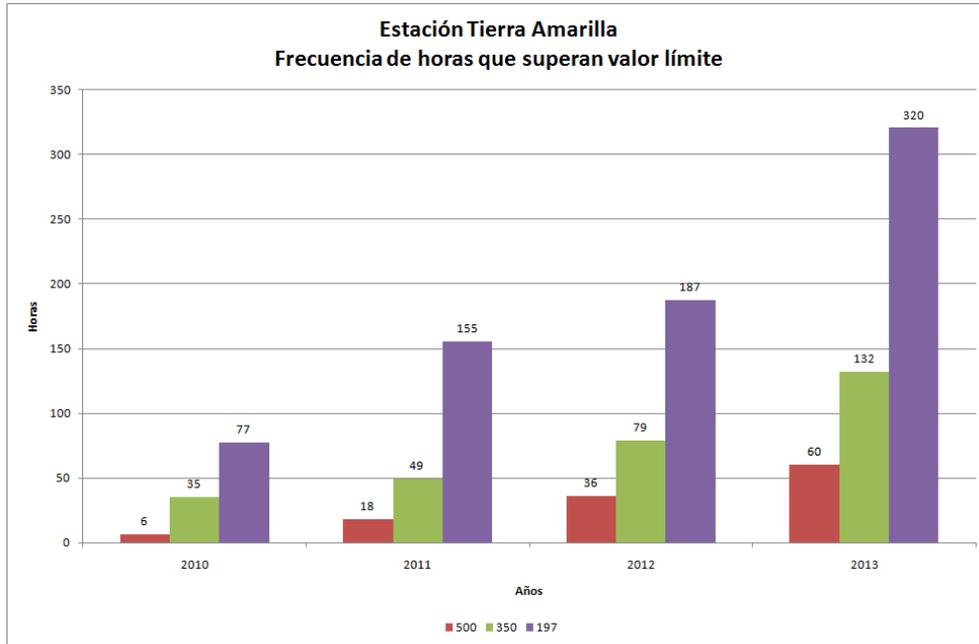
**Figura 143. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Paipote, Copiapó**

En la Figura 143 se aprecia que el número de superaciones de norma aumentó en el año 2013 en la estación Paipote, en comparación con los años 2010, 2011 y 2012 que se mantienen mayormente constantes en el número de superaciones de norma horaria.



**Figura 144. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Copiapó**

La figura muestra las concentraciones horarias de  $\text{SO}_2$  entre los años 2010 y 2013 en la estación Tierra Amarilla. Se puede apreciar que los escenarios regulatorios propuestos son superados todos los años. El año 2013 se aprecia con un aumento en las concentraciones.



**Figura 145. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Tierra Amarilla, Copiapó**

En la Figura 145 se puede apreciar que existe una tendencia al aumento en el número de las superaciones horarias entre los años 2010 y 2013 para los 3 escenarios regulatorios propuestos. Estos resultados son similares a los observados en la estación Paipote en la zona Copiapó-Paipote.

vi) Huasco (Compañía de Bomberos Huasco Bajo y Escuela José Miguel Carrera)

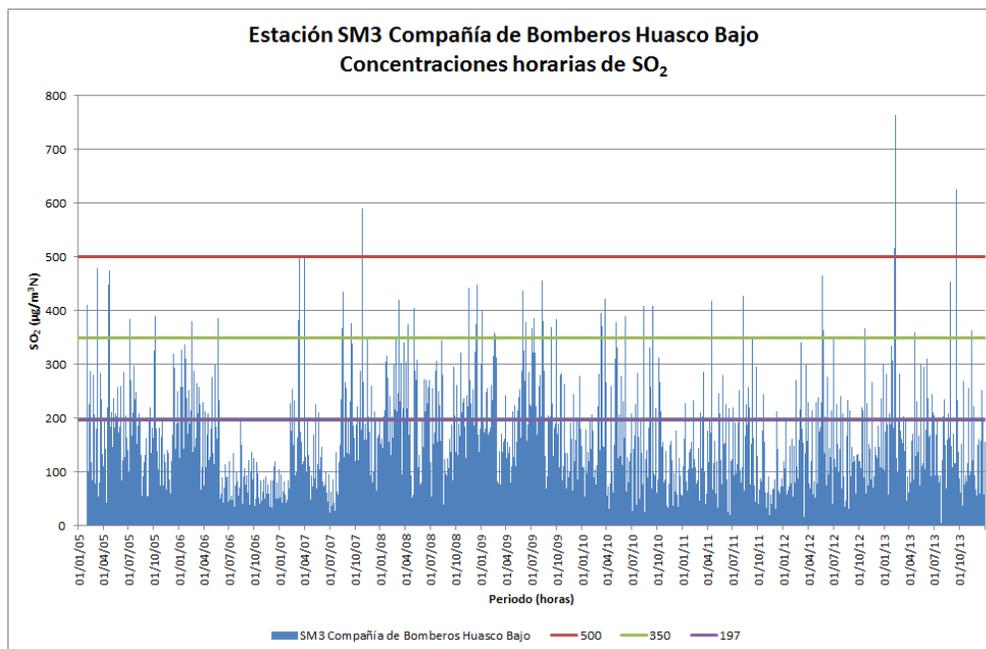
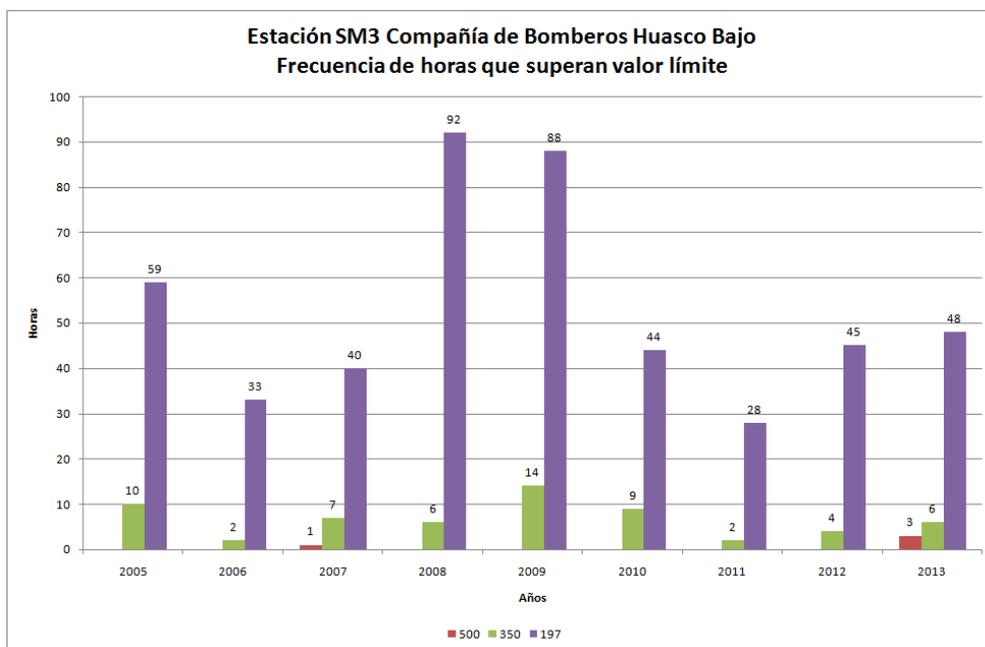


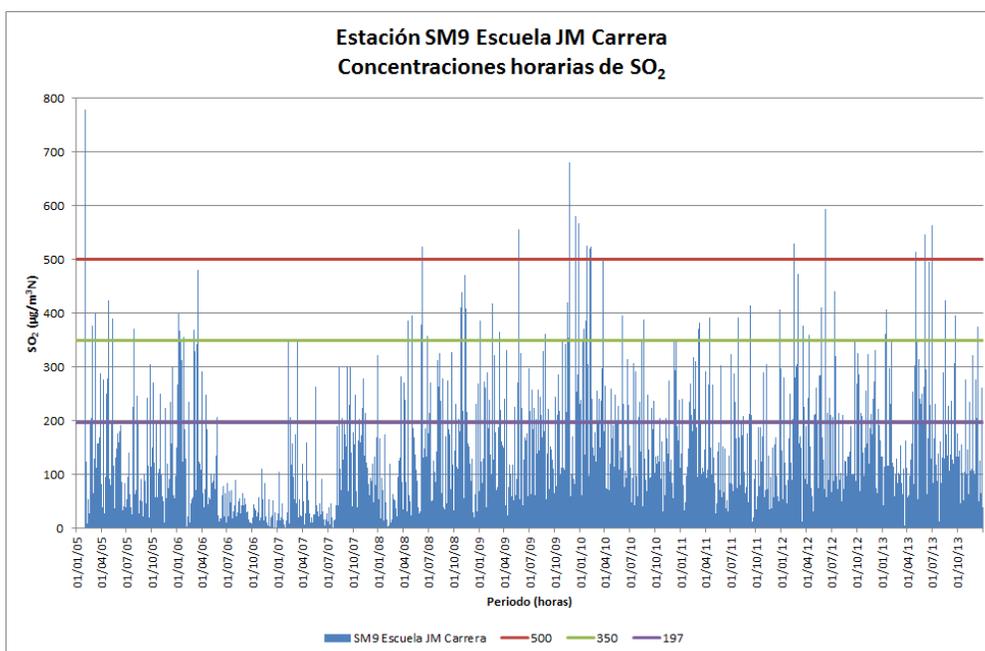
Figura 146. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco

La figura muestra las concentraciones horarias en la estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo entre los años 2005 y 2013, más los 3 escenarios regulatorios propuestos. Se observa un comportamiento constante en el tiempo, la mayoría de las concentraciones se presentan entre el escenario de 197 y 350 µg/m<sup>3</sup>.



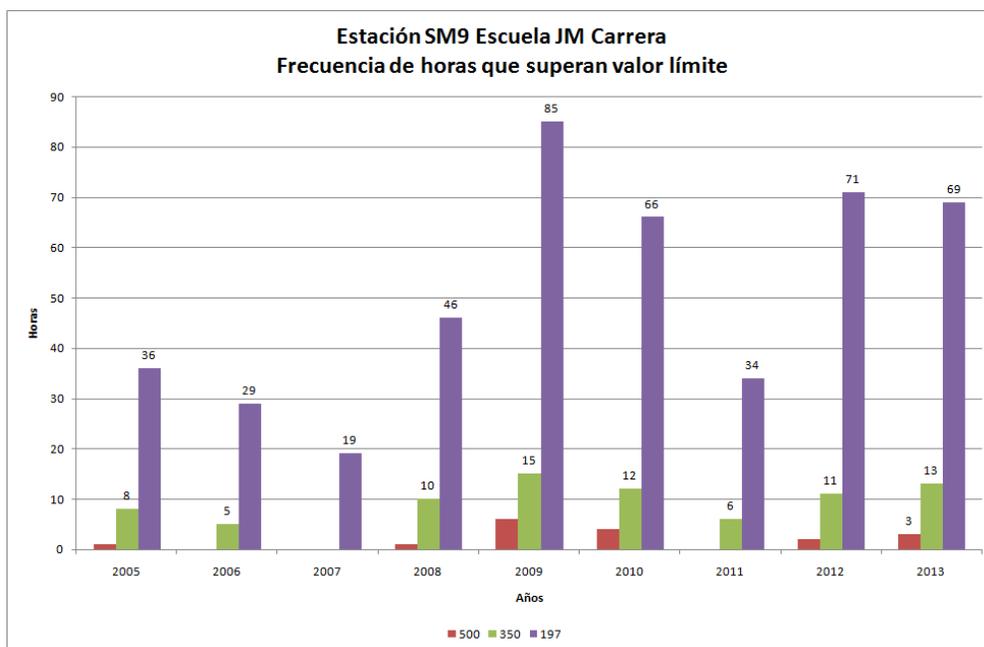
**Figura 147. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación SM9 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco**

En la Figura 147 se muestra el número de horas que se superaron los 3 escenarios propuestos de regulación. Se puede apreciar que la normativa de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  es superada solo 3 veces durante el año 2013 y la normativa de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$  es superada 2, 4 y 6 veces en los últimos 3 años respectivamente. Entre 2010 y 2013 el escenario más estricto,  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se ha mantenido relativamente constante en cuanto al número de horas superadas.



**Figura 148. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela J.M. Carrera, Huasco**

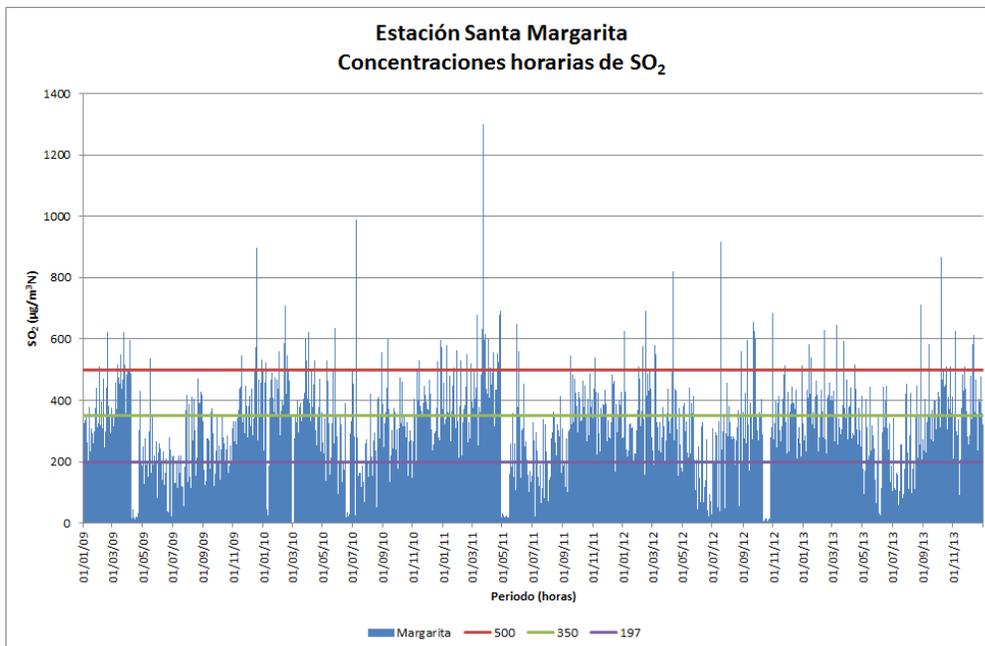
En la figura se muestran las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> y los escenarios propuestos en la estación Escuela José Miguel Carrera.



**Figura 149. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Escuela J.M. Carrera, Huasco**

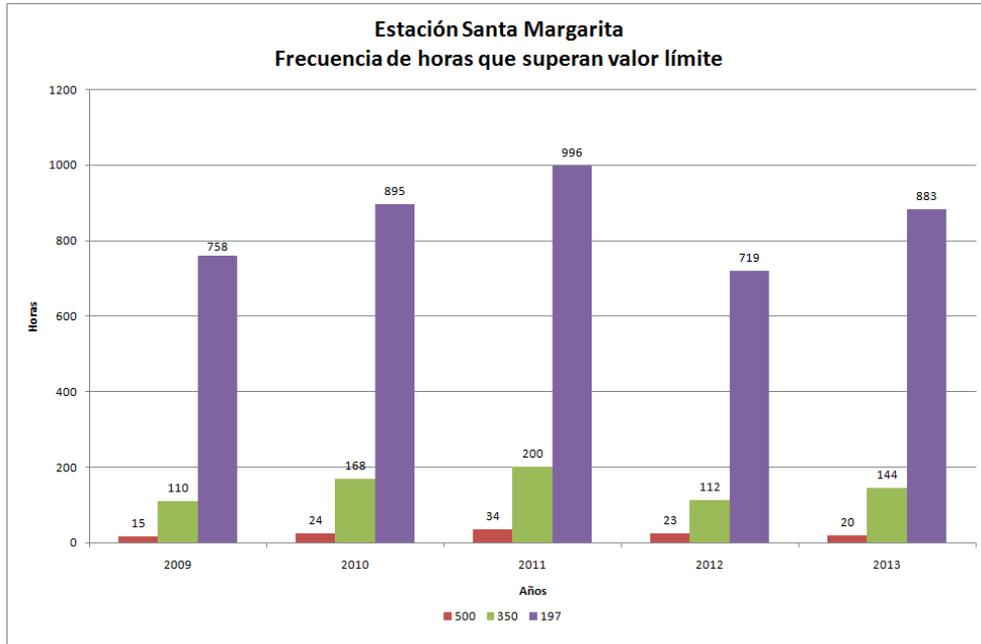
En la Figura 149 se muestra el número de horas de superación de los 3 escenarios propuestos entre los años 2005 y 2013 para la estación Escuela José Miguel Carrera. Los escenarios 350 y 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  son superados en aisladas ocasiones en el periodo estudiado, similar a lo observado en la estación SM3 en Huasco.

vii) Catemu – Llay Llay



**Figura 150. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay**

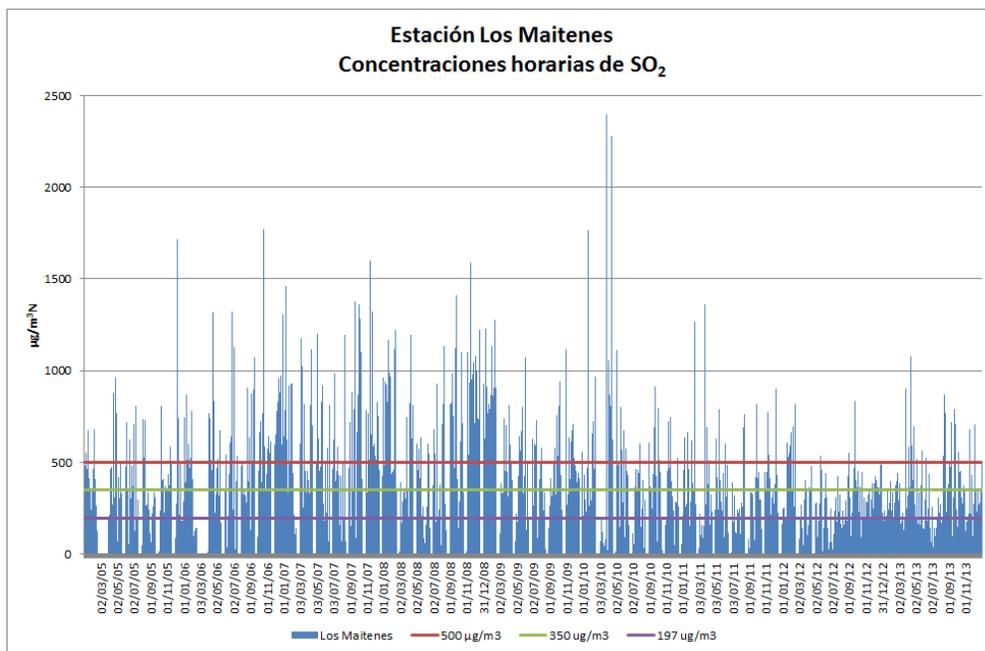
En la figura anterior se muestran las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la estación Santa Margarita entre los años 2009 y 2013.



**Figura 151. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay**

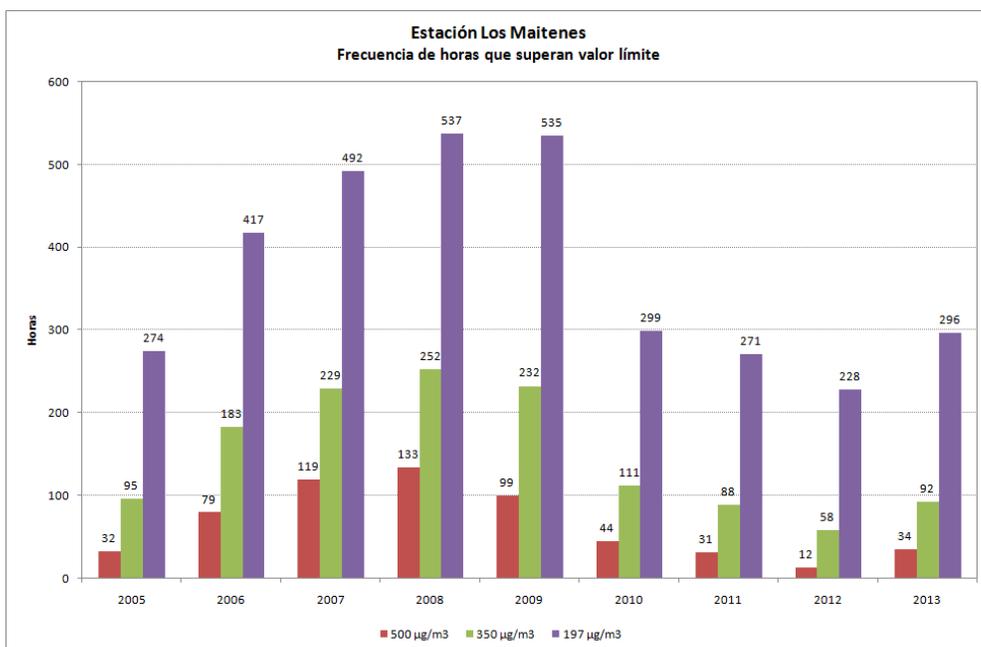
En la estación Santa Margarita, el número de superaciones horarias de los 3 escenarios propuestos se ha mantenido constante entre los años 2009 y 2013.

viii) Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL)



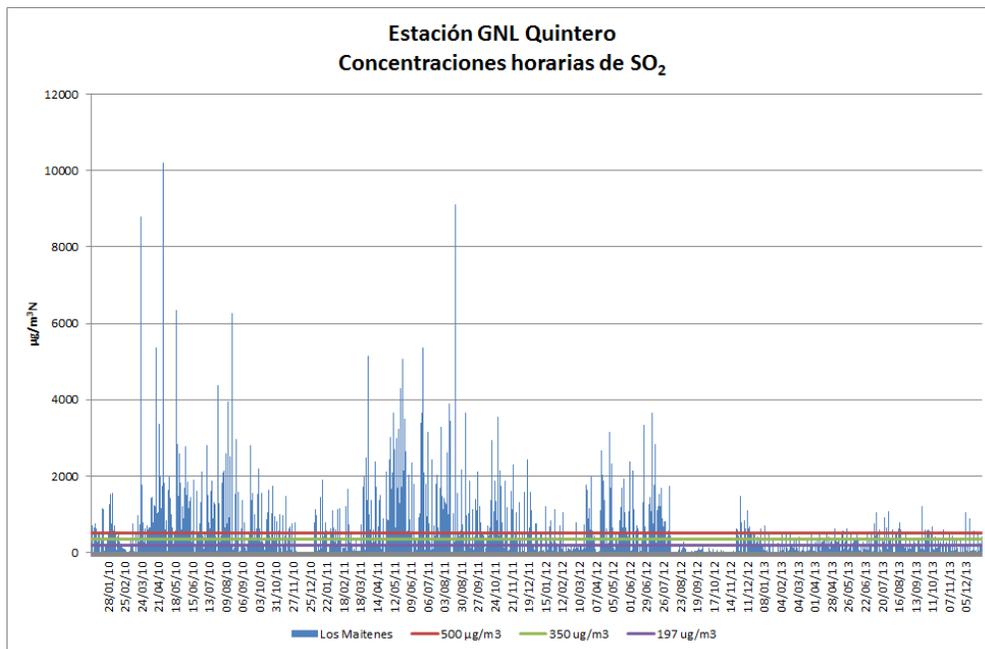
**Figura 152. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví**

La figura muestra las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> en la estación Los Maitenes entre los años 2005 y 2013. Se observa una disminución en las concentraciones, y por consiguiente en el número de horas sobre los valores límites propuestos, desde el año 2010.



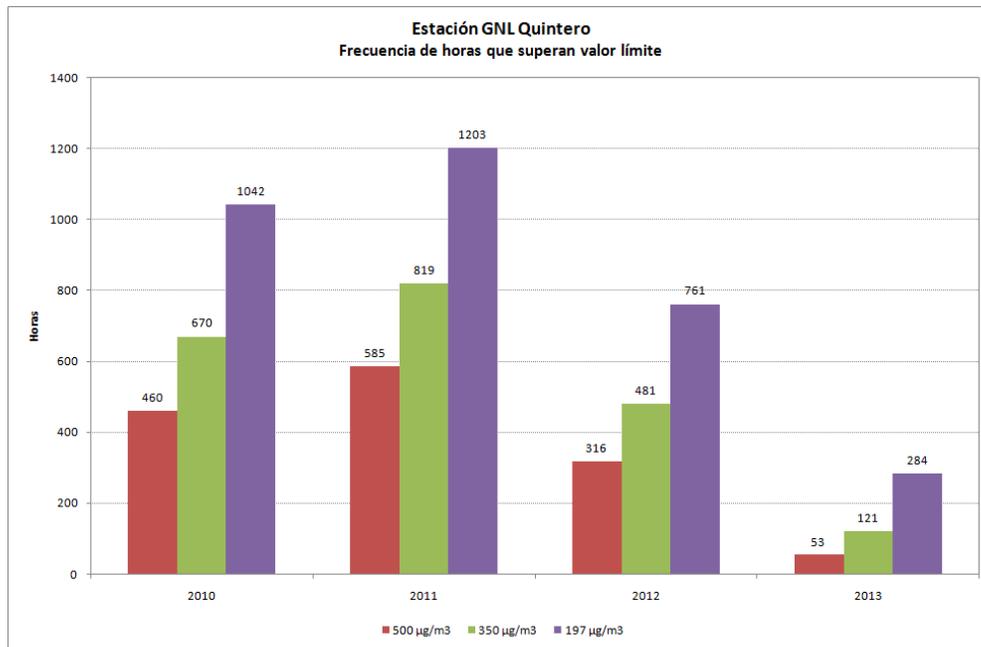
**Figura 153. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví**

En la estación Los Maitenes se aprecia una disminución en el número de horas con superación de norma desde el año 2010. Es a partir de 2010 cuando se revierte la tendencia al aumento que existía entre 2005 y 2009.



**Figura 154. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví**

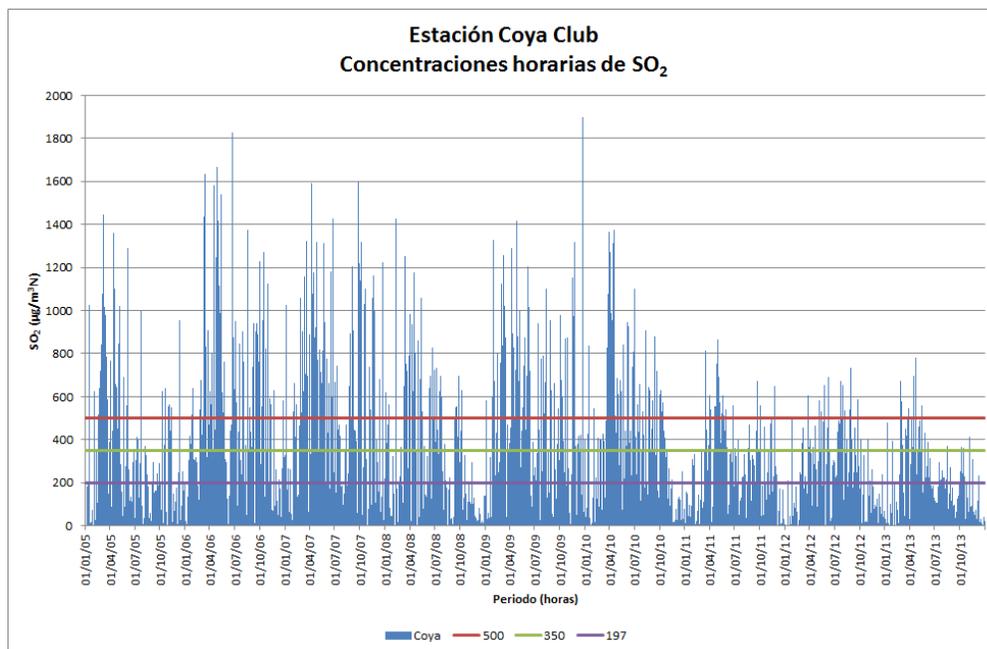
La figura muestra las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> en la estación GNL Quintero, se puede apreciar una disminución en los valores extremos altos a partir del año 2012.



**Figura 155. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví**

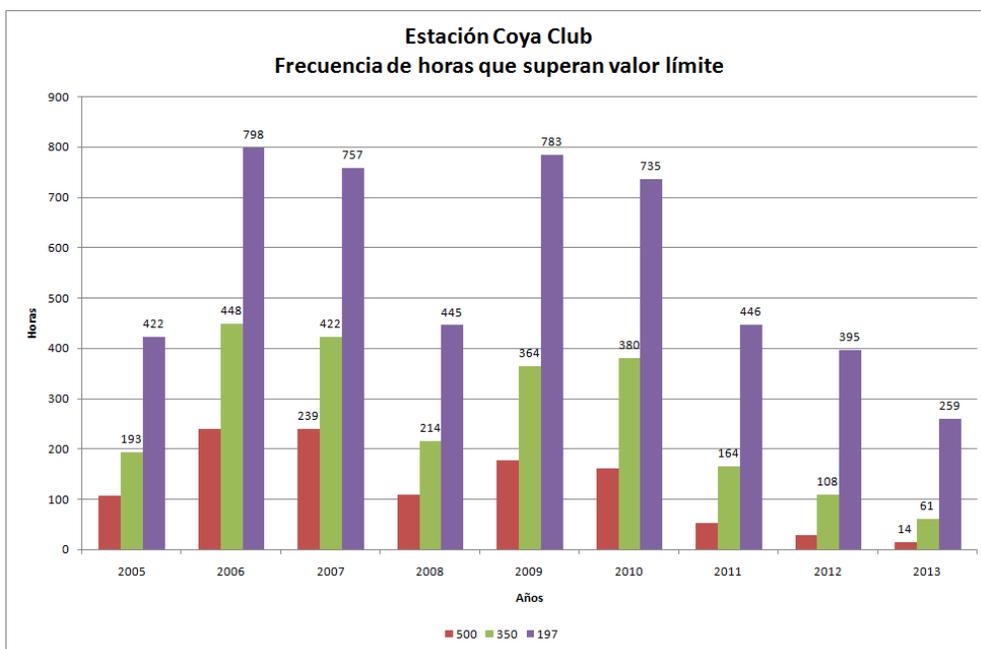
En la Figura 155 se muestra el número de horas con superación de norma para los 3 escenarios propuestos en la estación GNL Quintero. Se puede apreciar que el año 2013 está por debajo de los años antecesores.

ix) Machalí – Coya



**Figura 156. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí - Coya**

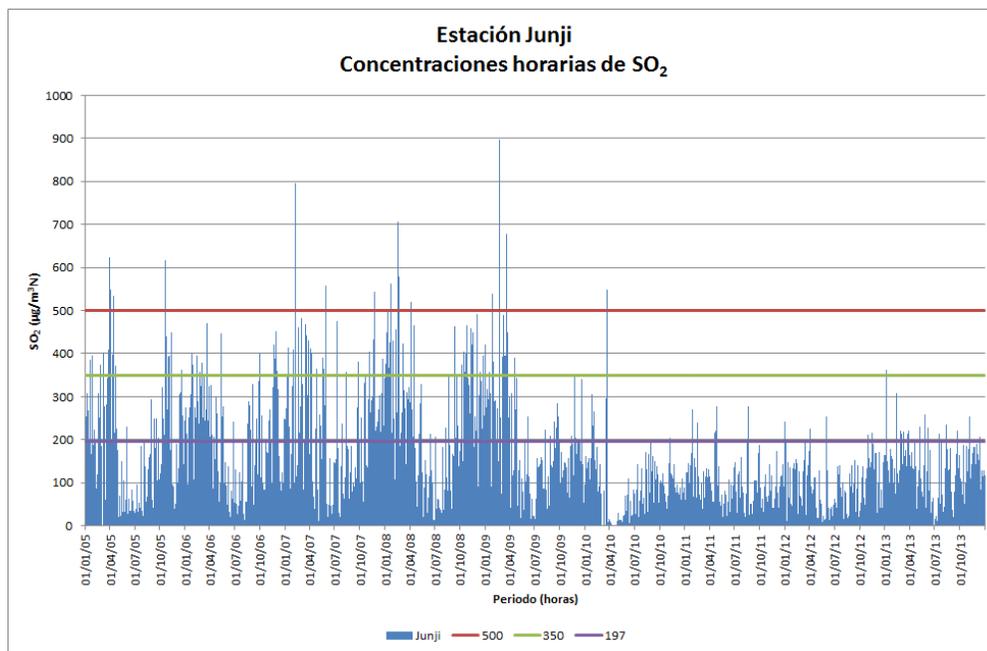
La figura muestra las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> en la estación Coya Club entre los años 2005 y 2013 y la comparación con los 3 escenarios regulatorios propuestos. Se puede apreciar una disminución en las concentraciones a partir del año 2011.



**Figura 157. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Coya Club, Machalí - Coya**

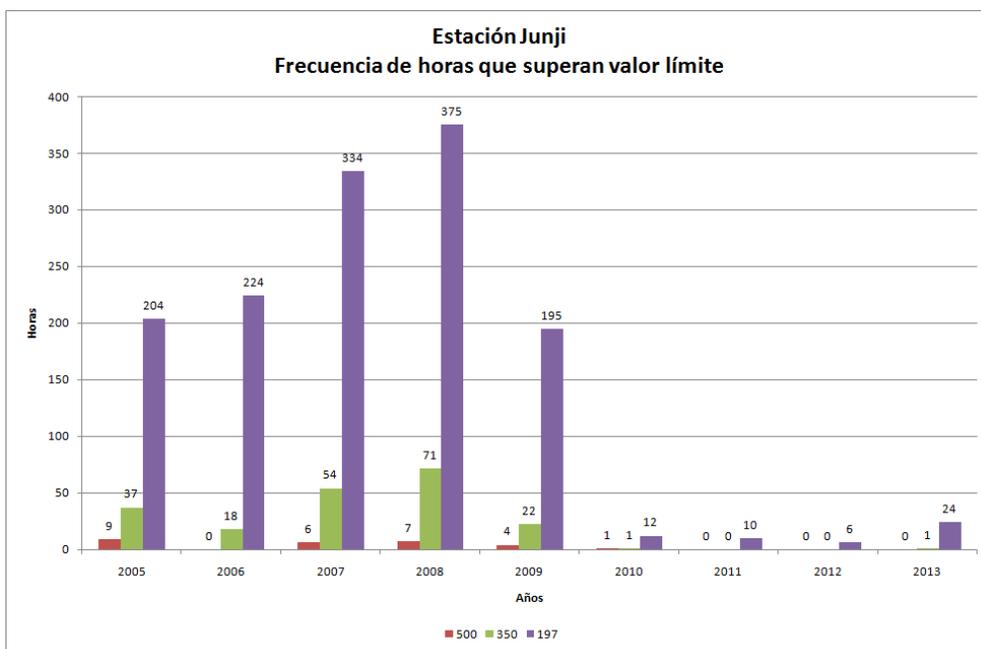
En la Figura 157 se muestran las superaciones de norma horaria entre 2005 y 2013 en Coya Club. Se puede observar que desde el año 2009 existe una tendencia a la disminución en las superaciones de norma para los 3 escenarios propuestos.

x) Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano



**Figura 158. Concentraciones horarias y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano**

En la estación Junji, las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> muestran una disminución en los valores desde el año 2010, como se puede apreciar en la figura.

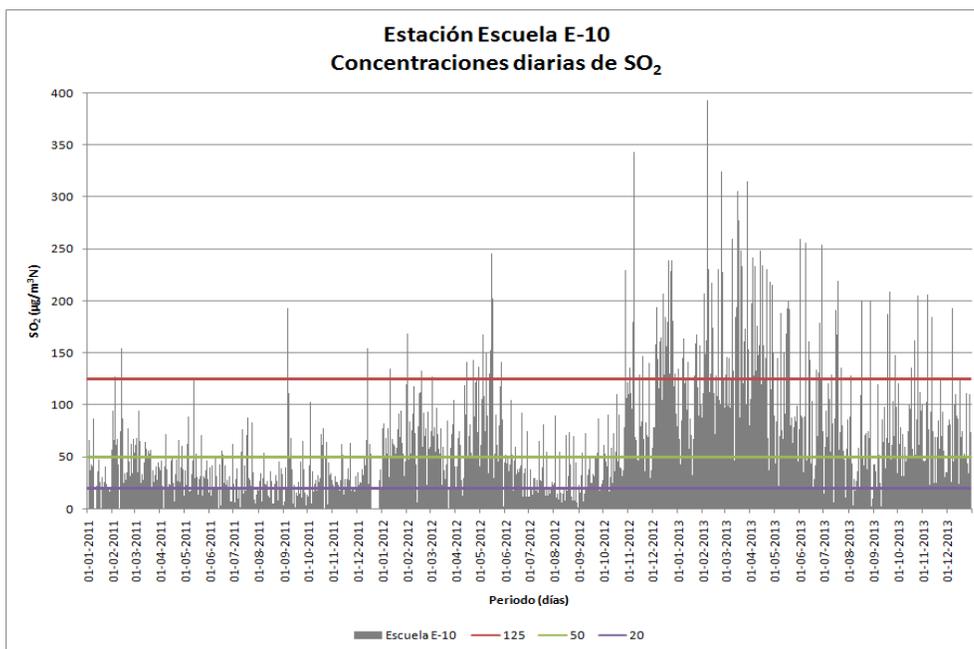


**Figura 159. Superación de valores propuestos para la norma horaria estación Junji, Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano**

En la Figura 159 se puede apreciar que desde el año 2010 las superaciones de norma son escasas y prácticamente solo de la norma de 197  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

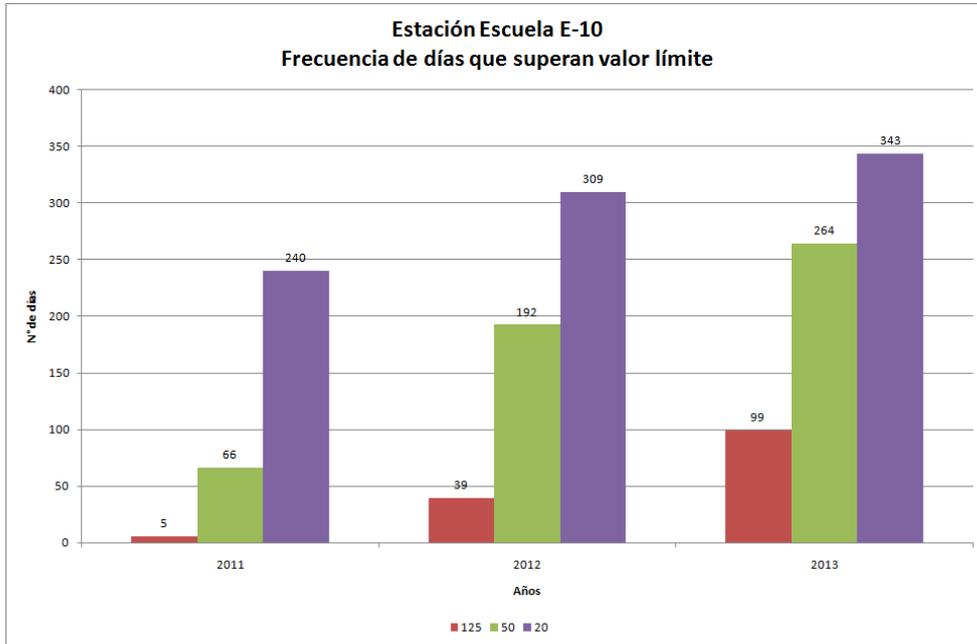
## Situación de superación de niveles de SO<sub>2</sub>, resolución diaria

### i) Tocopilla



**Figura 160. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla**

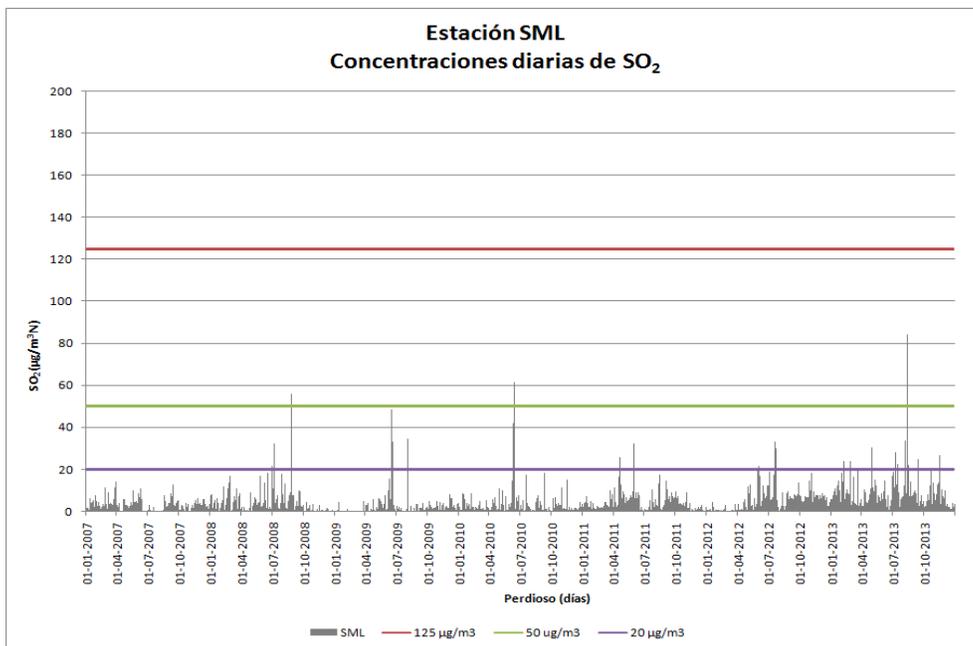
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Escuela E-10 y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



**Figura 161. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Escuela E-10, Tocopilla**

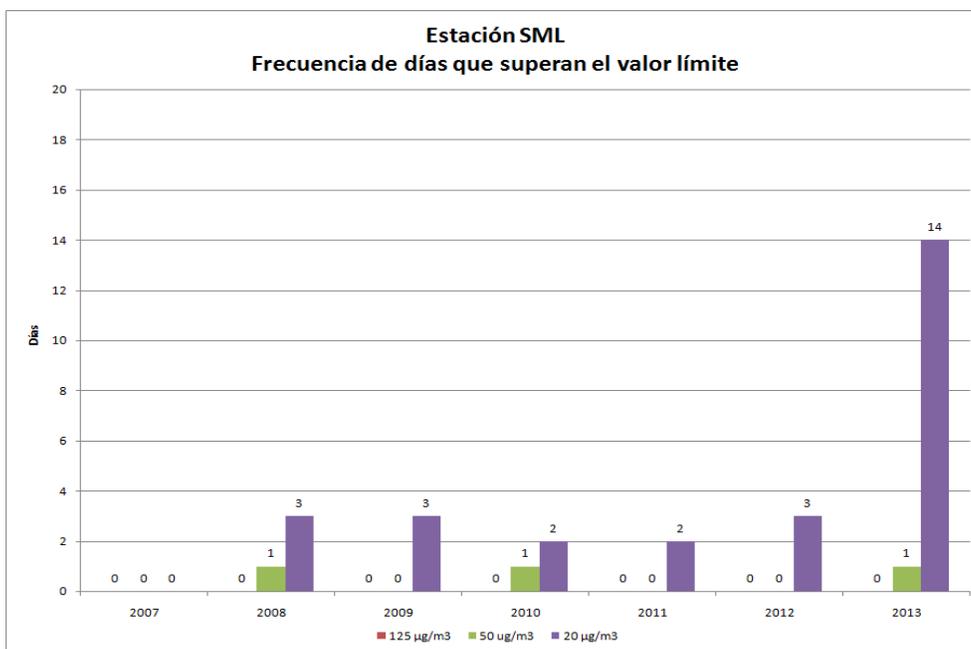
En la Figura 161 se muestra el número de superaciones de los escenarios regulatorios propuestos para la norma diaria. Se puede apreciar una tendencia al aumento en las superaciones de norma entre los años 2011 y 2013.

ii) Calama



**Figura 162. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama**

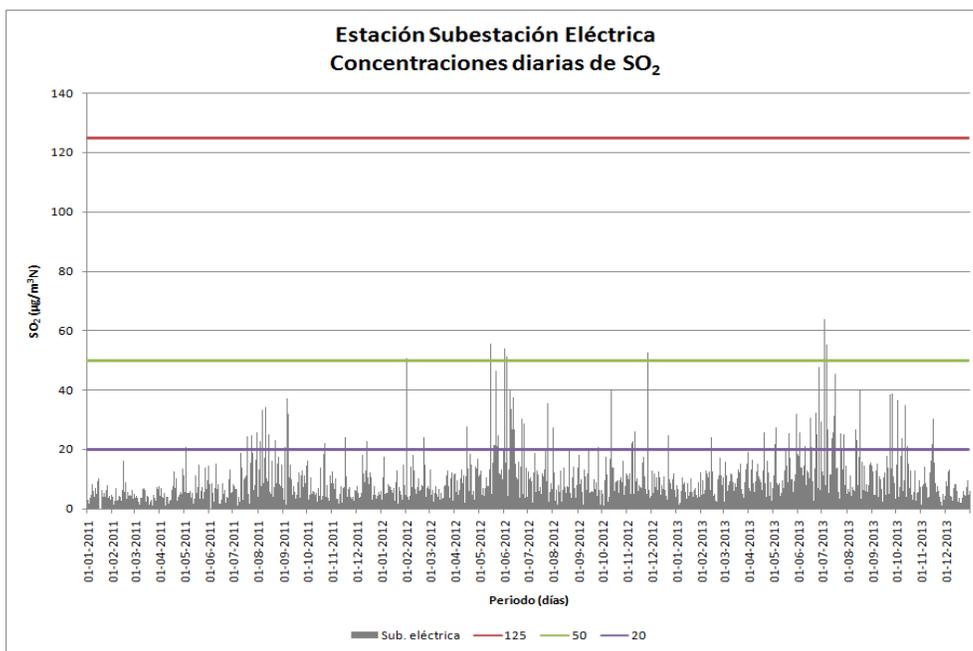
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de  $\text{SO}_2$  en la estación Escuela SML y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



**Figura 163. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SML, Calama**

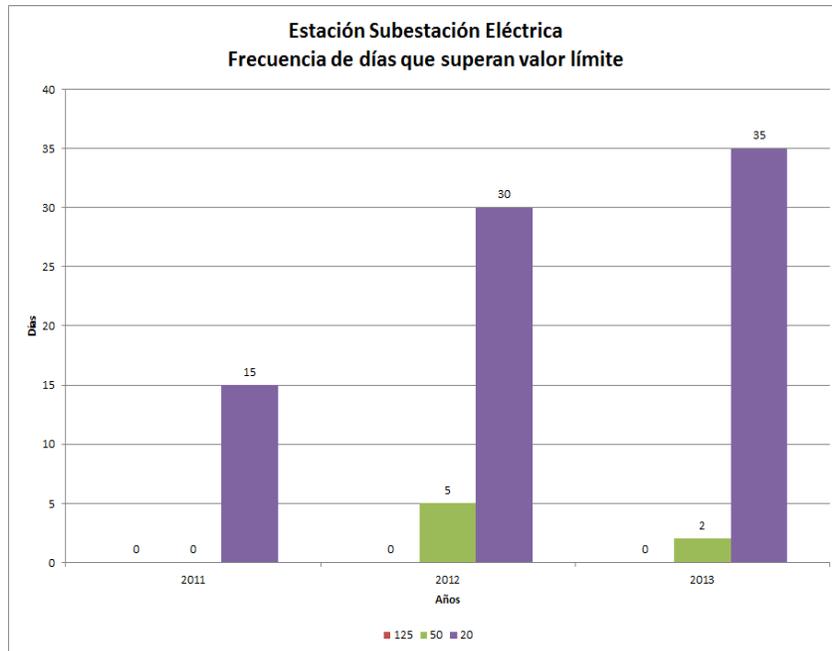
En la Figura 163 se puede apreciar que el mayor número de superaciones del escenario  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se produce durante 2013. Prácticamente no se superan los otros 2 escenarios propuestos.

iii) Mejillones



**Figura 164. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

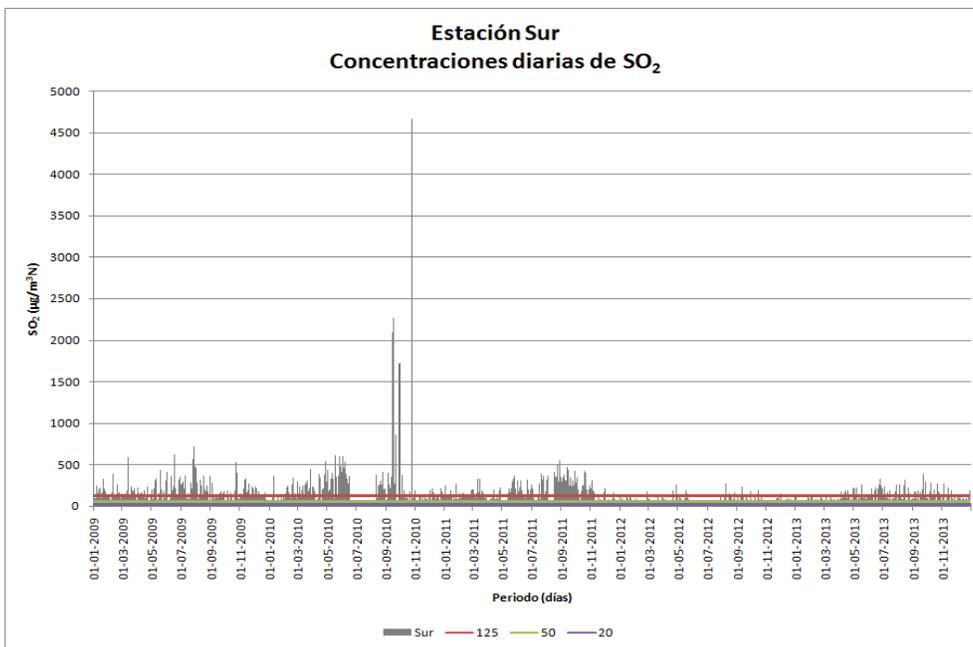
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de  $\text{SO}_2$  en la estación Subestación Eléctrica entre los años 2011 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



**Figura 165. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

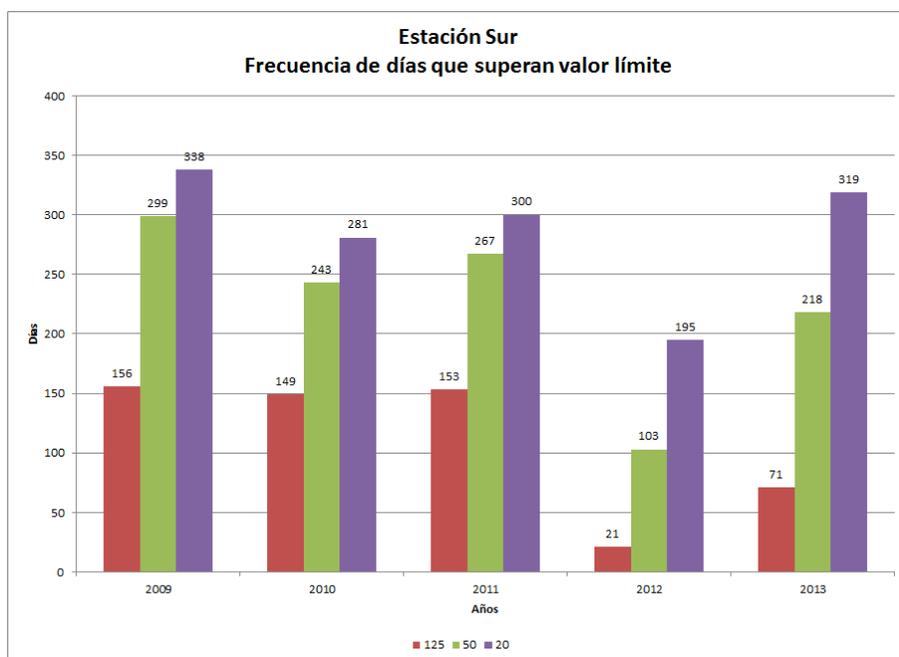
En la Figura 165 se puede apreciar que existe una tendencia al aumento en las superaciones de la norma de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , no obstante, la normativa de  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no es superada en los 3 años estudiados.

**iv) Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)**



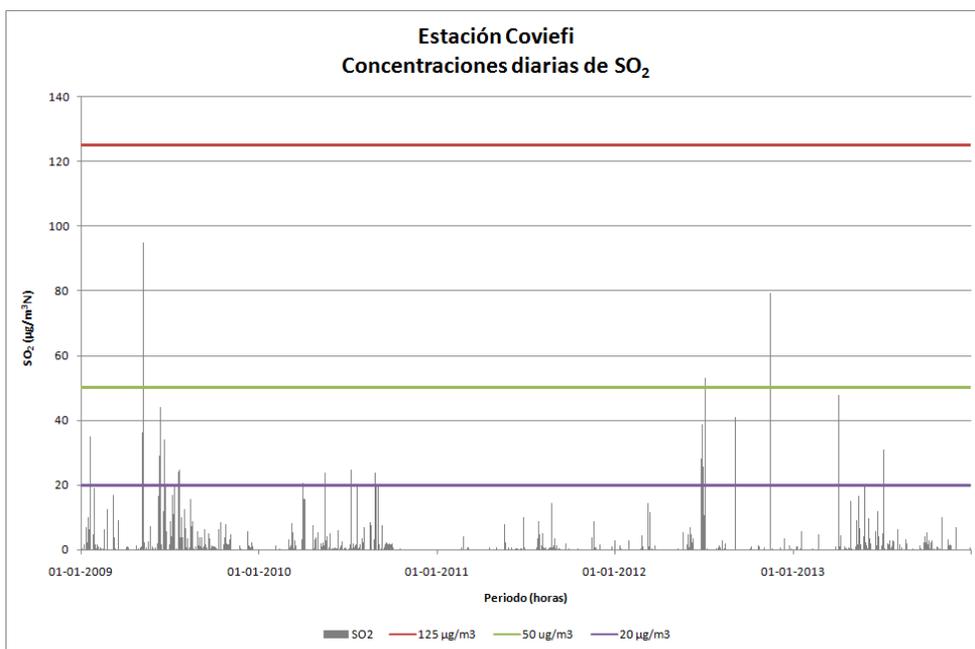
**Figura 166. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, Antofagasta – La Negra**

En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Sur entre los años 2009 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Destaca en la figura la ocurrencia de peaks al finalizar el año 2010.



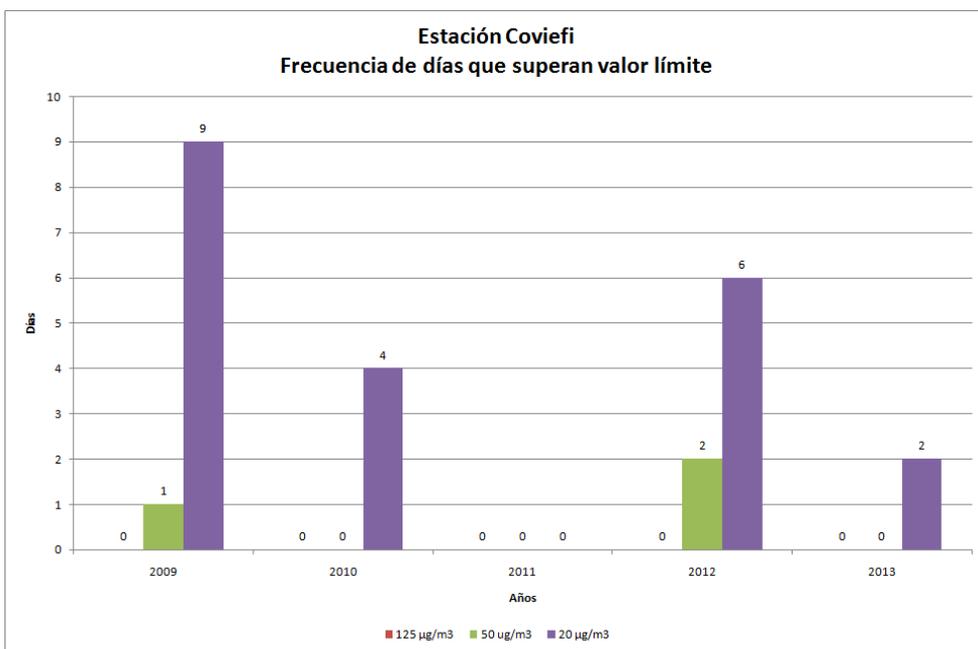
**Figura 167. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Sur, Antofagasta – La Negra**

En la Figura 167 se muestran las superaciones de las normas diarias propuestas para la estación Sur, se puede apreciar que en 2012 y 2013 disminuyó el número de superaciones de las normativas 125 y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en comparación con los años anteriores, no obstante, las superaciones de la norma de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se han mantenido más o menos constantes en el tiempo.



**Figura 168. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta – La Negra**

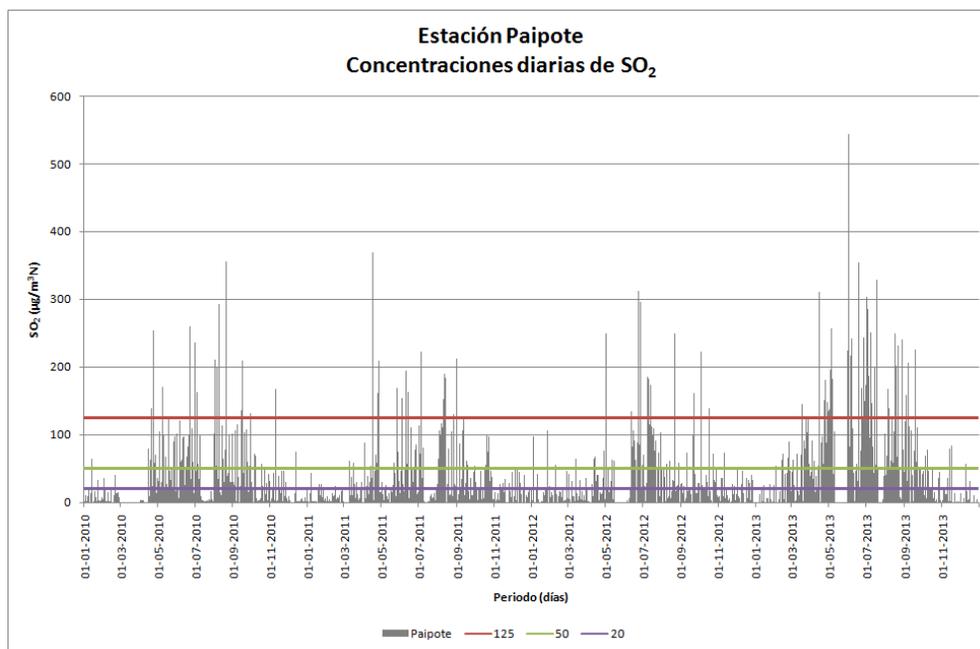
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de  $\text{SO}_2$  en la estación Coviefi entre los años 2009 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Destaca que el escenario de  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  no es superado en los años analizados y solo es superado esporádicamente el escenario de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 169. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Coviefi, Antofagasta – La Negra**

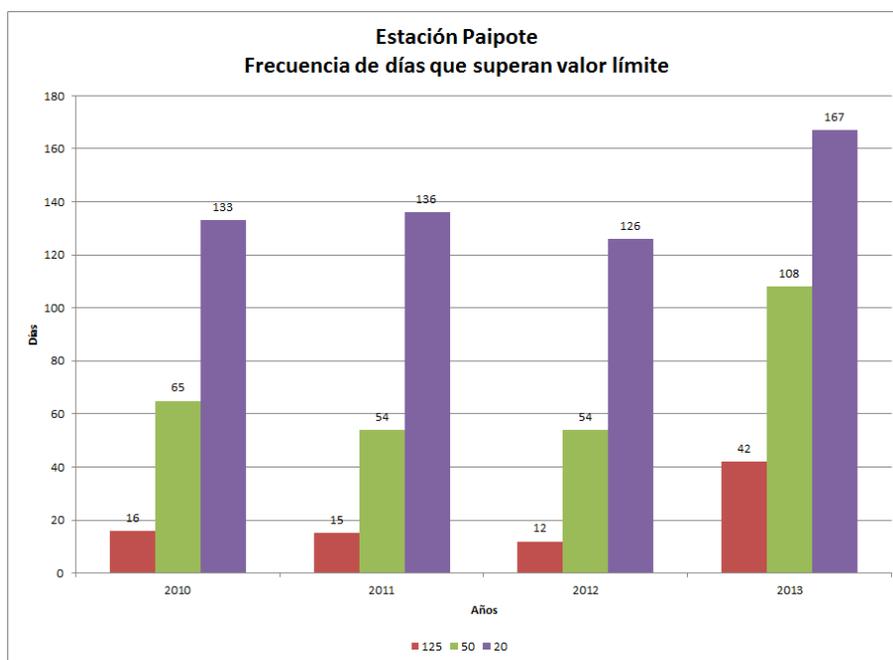
En la Figura 169 se puede apreciar que el mayor número de días se supera la norma más estricta propuesta,  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo las otras alternativas regulatorias prácticamente no son superadas en esta estación.

**v) Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Paipote y Tierra Amarilla)**



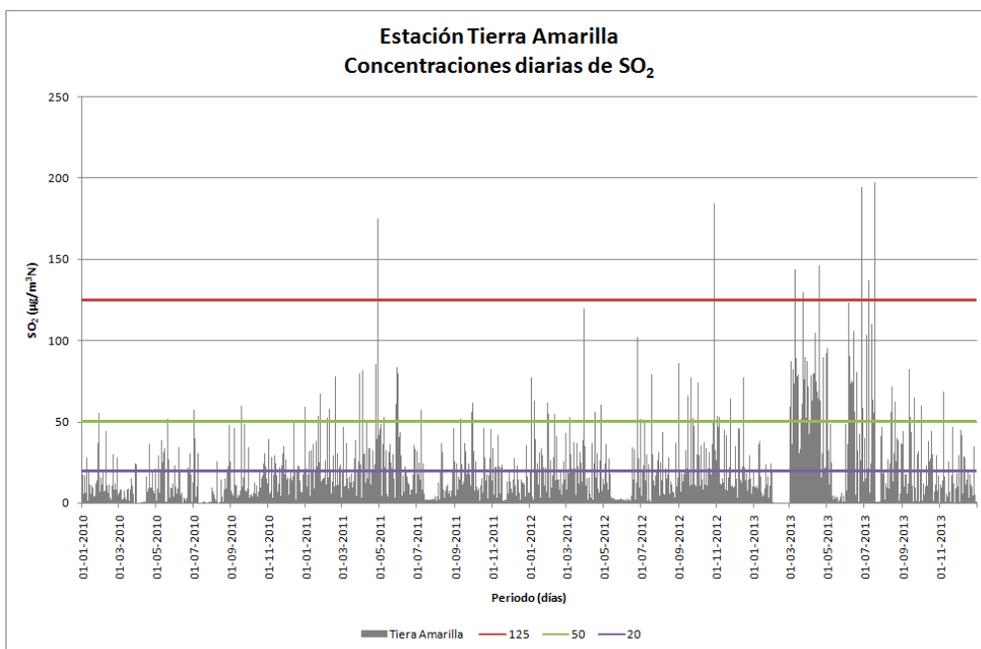
**Figura 170. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Copiapó**

En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Paipote entre los años 2010 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



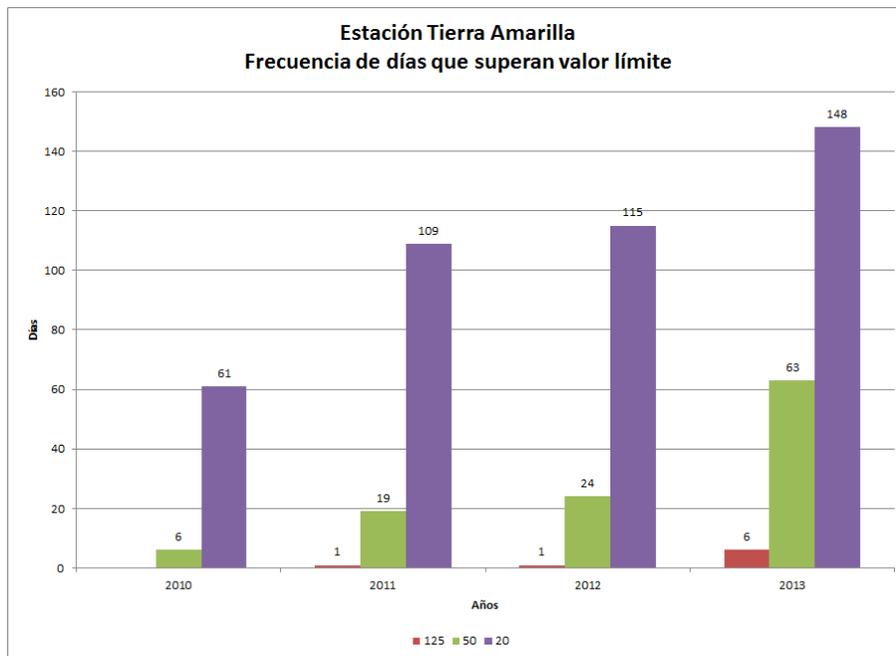
**Figura 171. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Paipote, Copiapó**

En la estación Paipote, el número de superaciones diarias se mantuvo constante entre los años 2010 y 2012, y para el año 2013 se observó un ligero aumento en el número de superaciones.



**Figura 172. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Copiapó**

En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Tierra Amarilla entre los años 2010 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



**Figura 173. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Tierra Amarilla, Copiapó**

En la estación Tierra Amarilla se observa una tendencia al aumento del número de superaciones diarias, para los 3 escenarios regulatorios propuestos.

vi) Huasco (SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo y SM9 Escuela José Miguel Carrera)

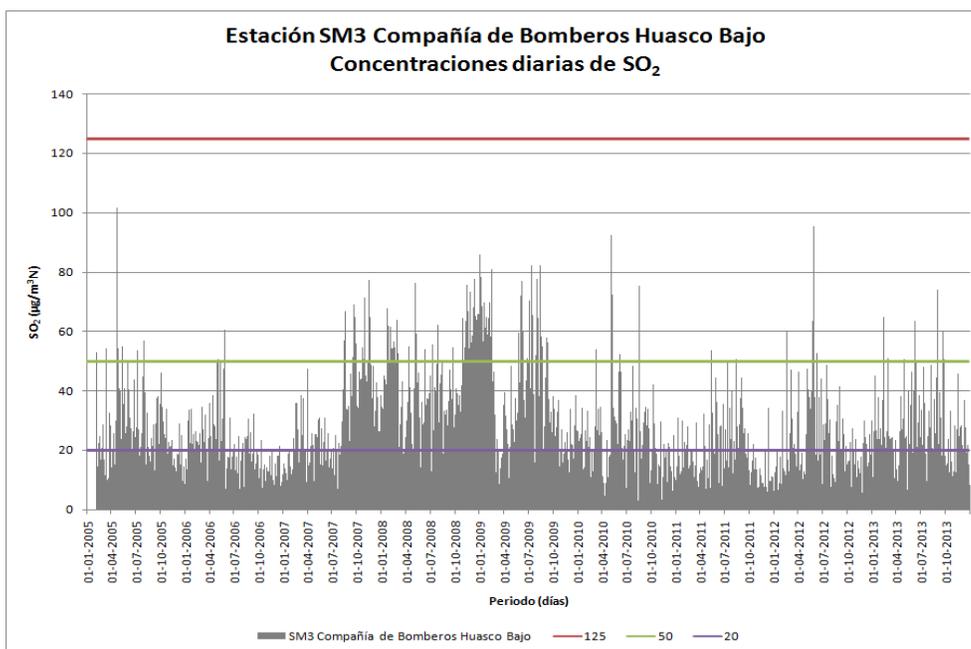
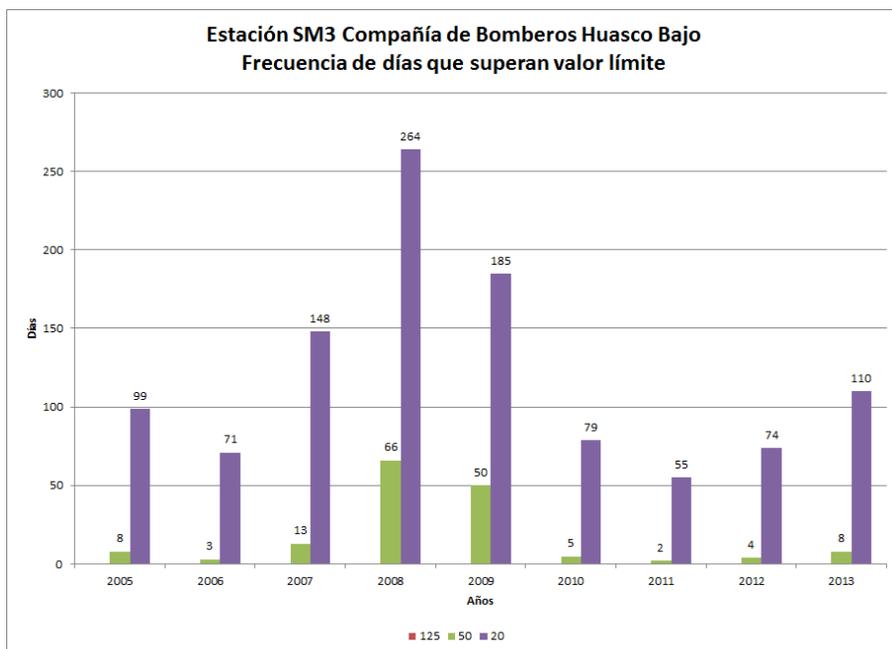


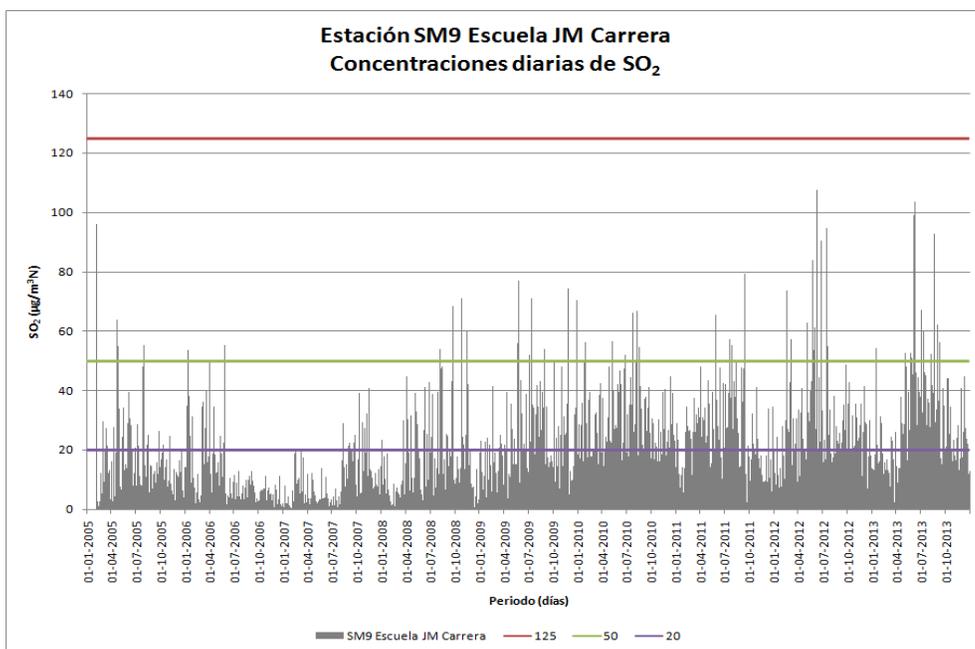
Figura 174. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco

En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Compañía de Bomberos entre los años 2005 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Se puede apreciar que las concentraciones están muy por debajo de la normativa de 125 µg/m<sup>3</sup>N.



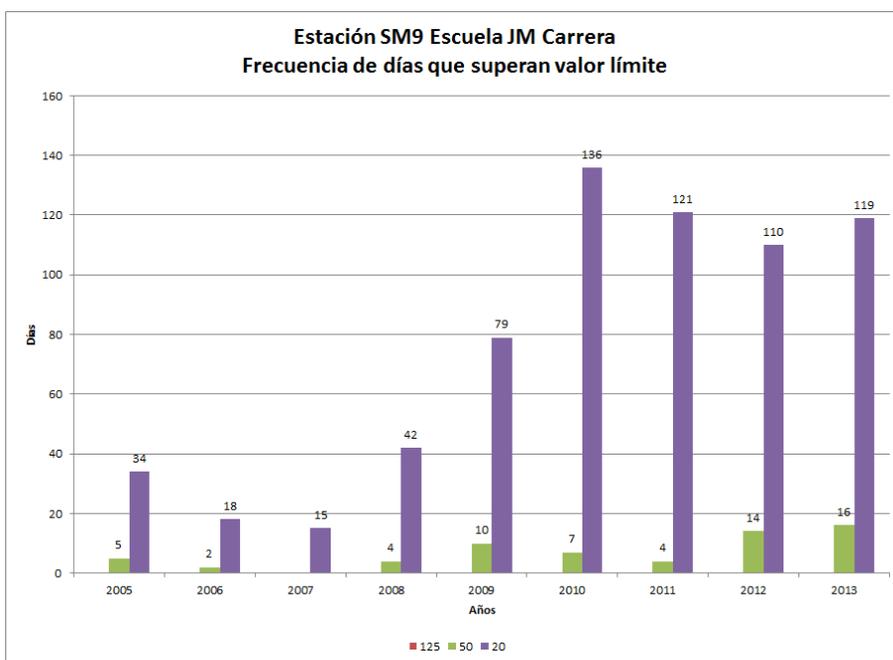
**Figura 175. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco**

En la Figura 175 se puede apreciar que en los últimos 3 años existe una tendencia al aumento en el número de superaciones de la norma de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , sin embargo, muy por debajo de lo observado entre los años 2007 y 2009.



**Figura 176. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación SM9 Escuela J.M. Carrera, Huasco**

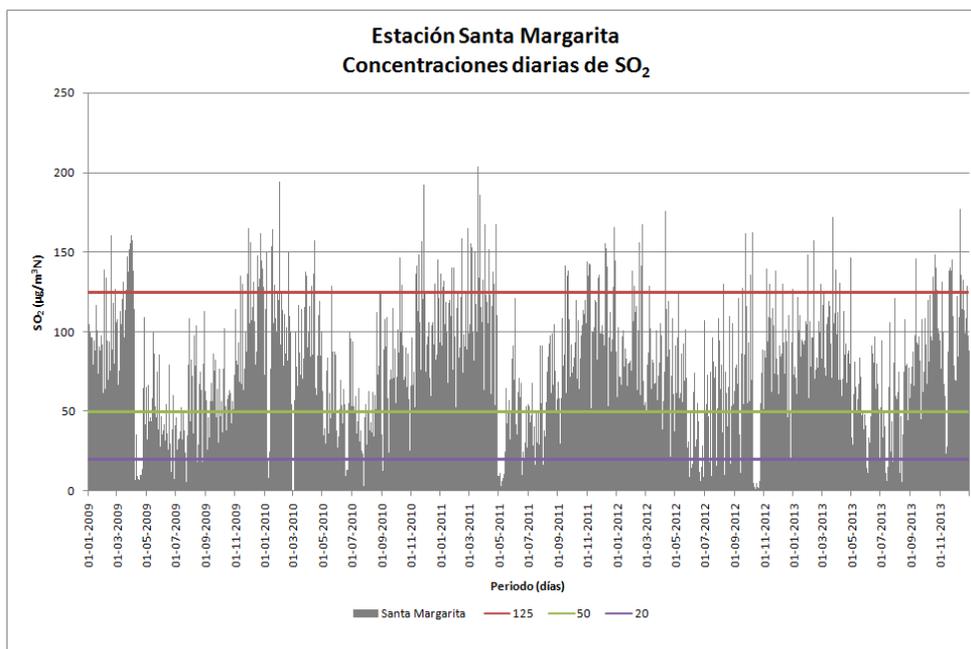
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Escuela José Miguel Carrera entre los años 2005 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Se puede apreciar que las concentraciones están muy por debajo de la normativa de 125 µg/m<sup>3</sup>.



**Figura 177. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación SM9 Escuela J. M. Carrera, Huasco**

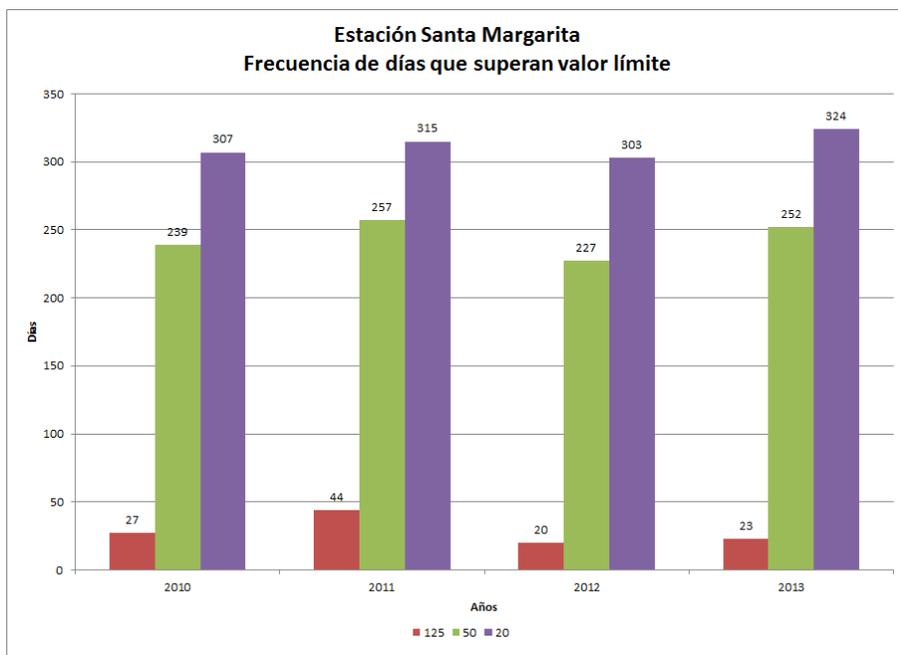
En la estación Escuela J. M. Carrera se observa una tendencia al aumento brusca a las superaciones de la norma de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  entre los años 2007 y 2010, desde entonces se mantuvo prácticamente constante. La normativa de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  se supera aisladamente, y la normativa propuesta a  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  no fue superada en esta estación.

**vii) Catemu – Llay Llay**



**Figura 178. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay**

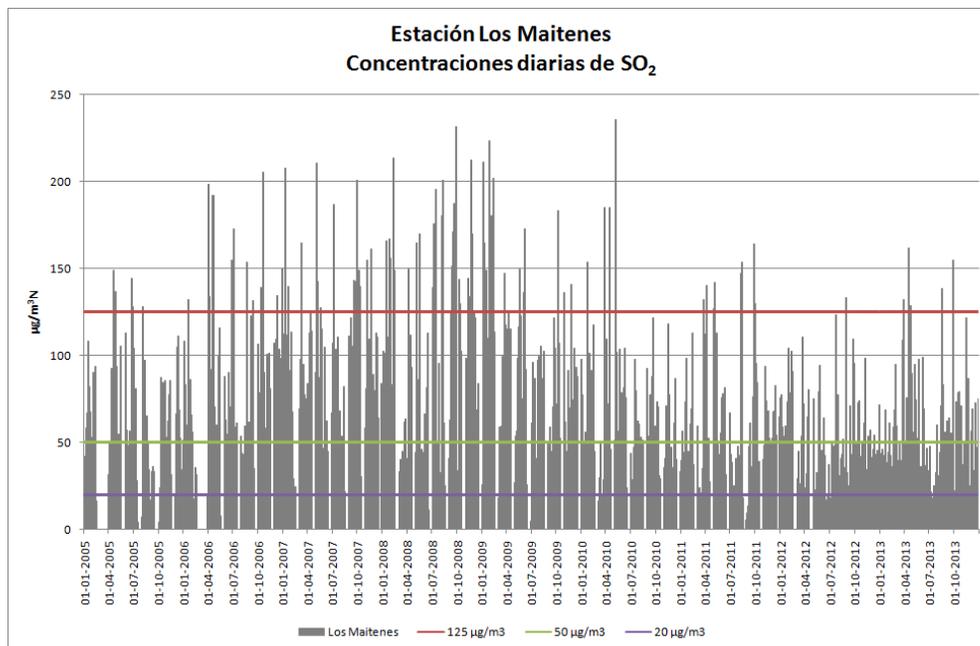
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Santa Margarita entre los años 2009 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal.



**Figura 179. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay**

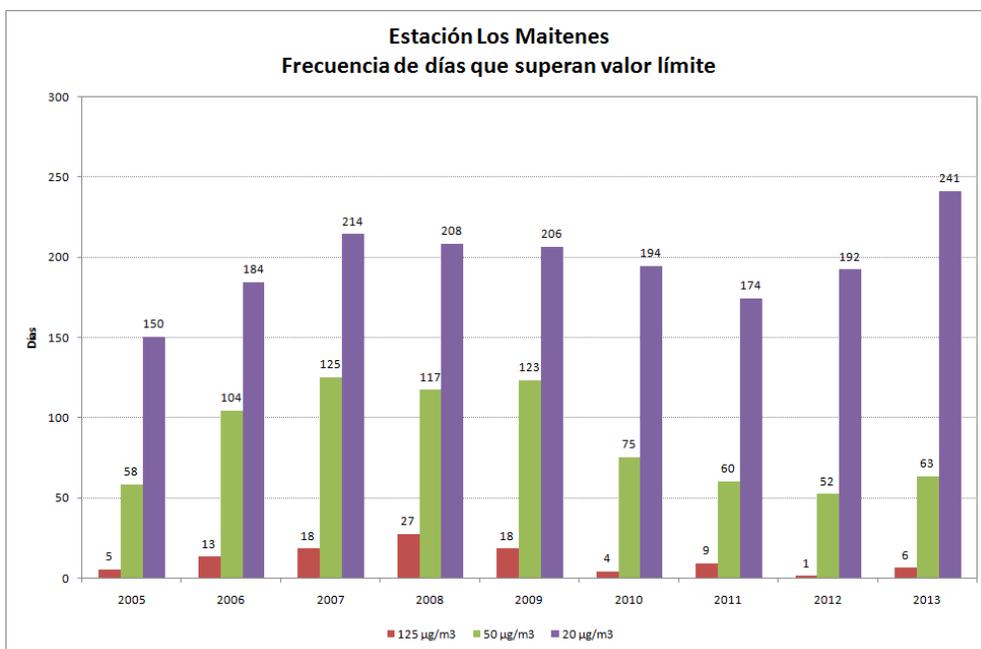
En la Figura 179 se puede apreciar que el número de superaciones diarias de los 3 escenarios regulatorios propuestos se ha mantenido constante durante el tiempo de estudio en la estación Santa Margarita.

viii) Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL Quintero)



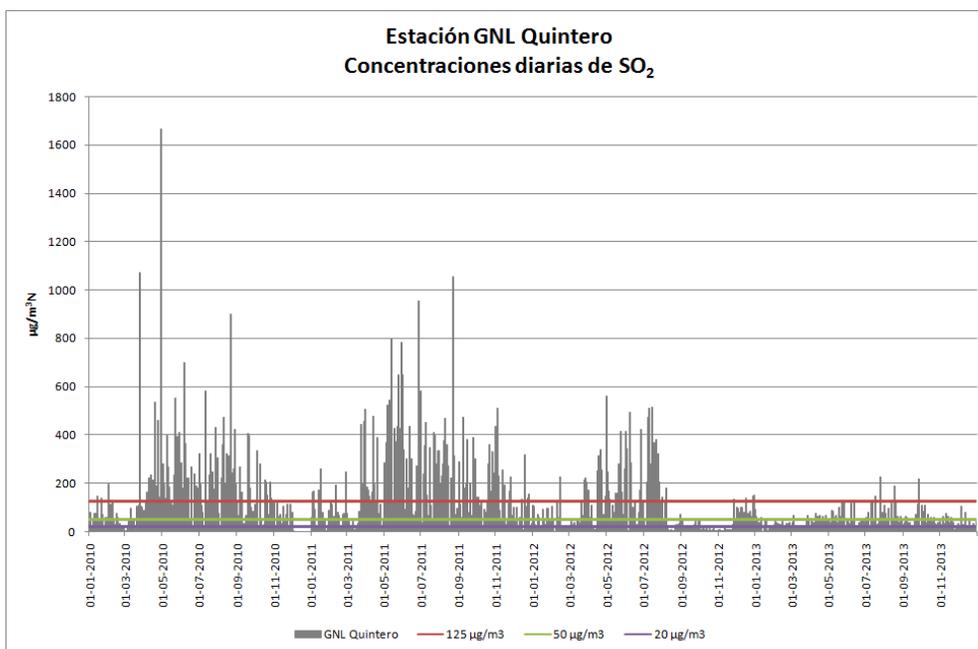
**Figura 180. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví**

En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de SO<sub>2</sub> en la estación Los Maitenes entre los años 2005 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Los 3 escenarios propuestos son superados a lo largo del tiempo.



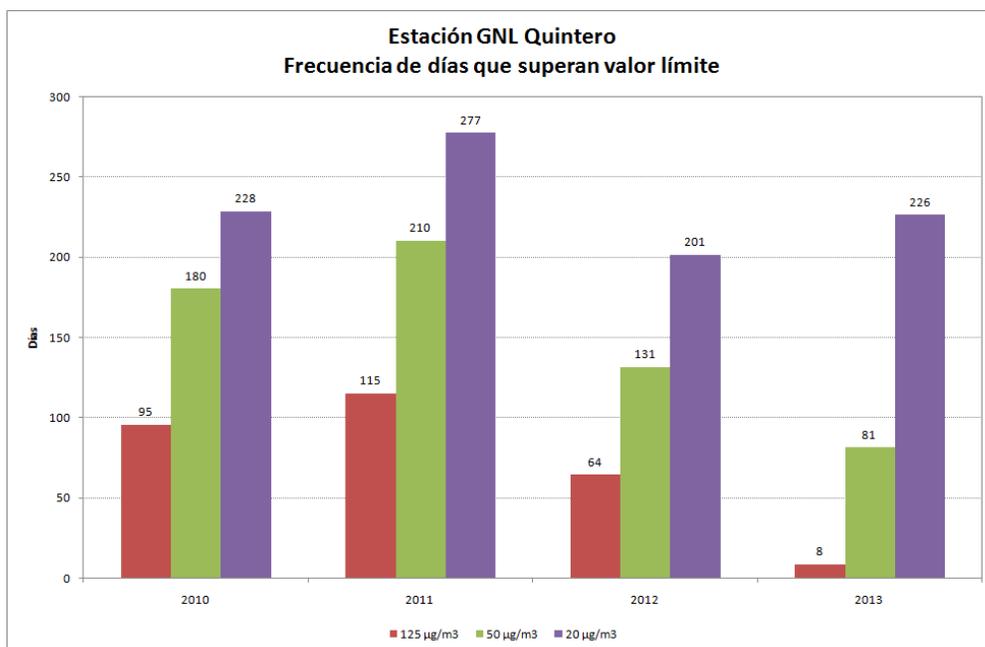
**Figura 181. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví**

En la Figura 181 se puede observar que desde el año 2010 el número de superaciones del escenario  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  ha disminuido, no obstante, el número de superaciones del escenario  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  ha aumentado.



**Figura 182. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví**

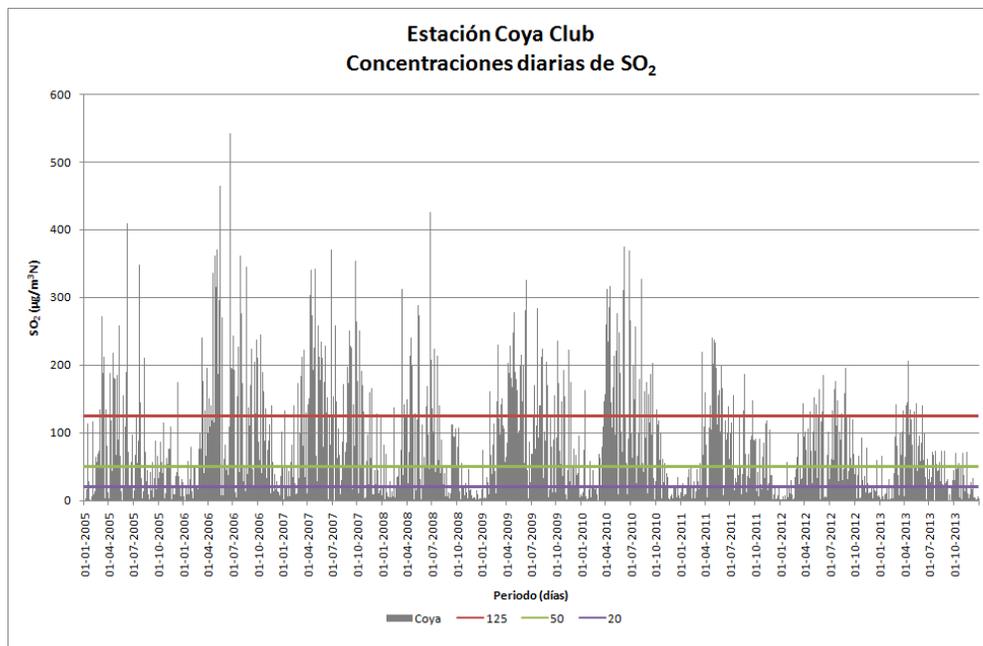
En la figura anterior se muestran las concentraciones diarias de  $\text{SO}_2$  en la estación GNL Quintero entre los años 2010 y 2013, y una comparación con los escenarios regulatorios propuestos para dicha resolución temporal. Se observan superaciones de los tres escenarios durante todos los años aunque con concentraciones máximas significativamente menores en el año 2013.



**Figura 183. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví**

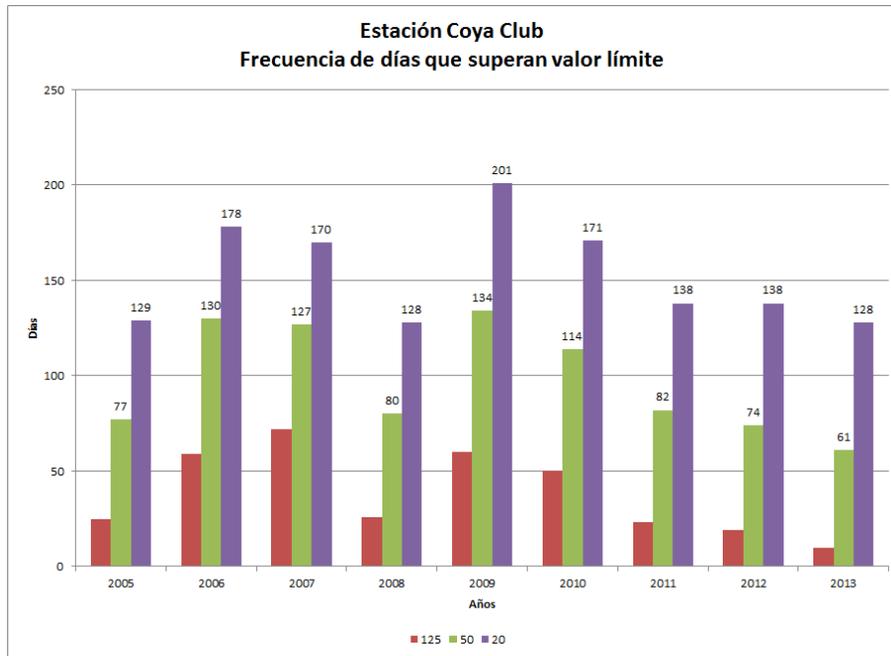
De la figura anterior se desprende que el año 2013 presenta una baja significativa en el escenario de 125 µg/m<sup>3</sup>N. La norma de 50 µg/m<sup>3</sup>N también presente una baja. El escenario más estricto por su parte muestra un alza respecto al 2012.

ix) Machalí – Coya



**Figura 184. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí Coya**

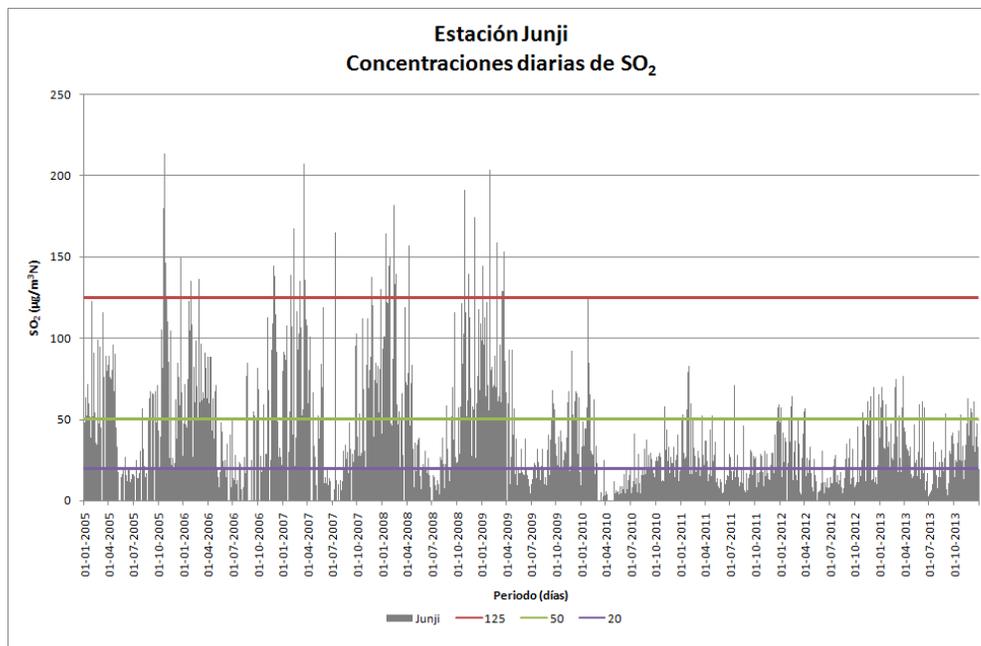
La figura anterior muestra la evaluación de escenarios para norma diaria de la estación Coya Club. Se observan superaciones de los tres escenarios para todos los años considerados en el estudio.



**Figura 185. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación Coya Club, Machalí - Coya**

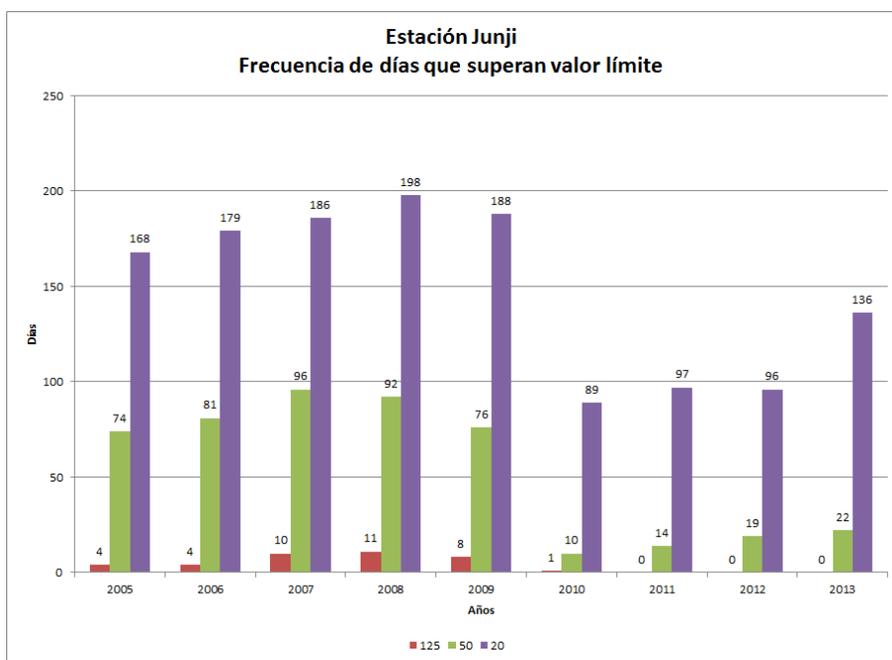
La figura anterior muestra una tendencia al descenso sostenido de los tres escenarios desde el año 2009, esto se aprecia desde el año 2009 hasta el 2013.

**x) Coronel – Lota – Hualpén - Talcahuano**



**Figura 186. Concentraciones diarias y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Hualpén**

La figura anterior muestra que a partir del año 2010 el comportamiento de las concentraciones cambió. Se superan sólo dos de los tres escenarios evaluados. También a partir de ese año se observa un descenso de las concentraciones máximas.

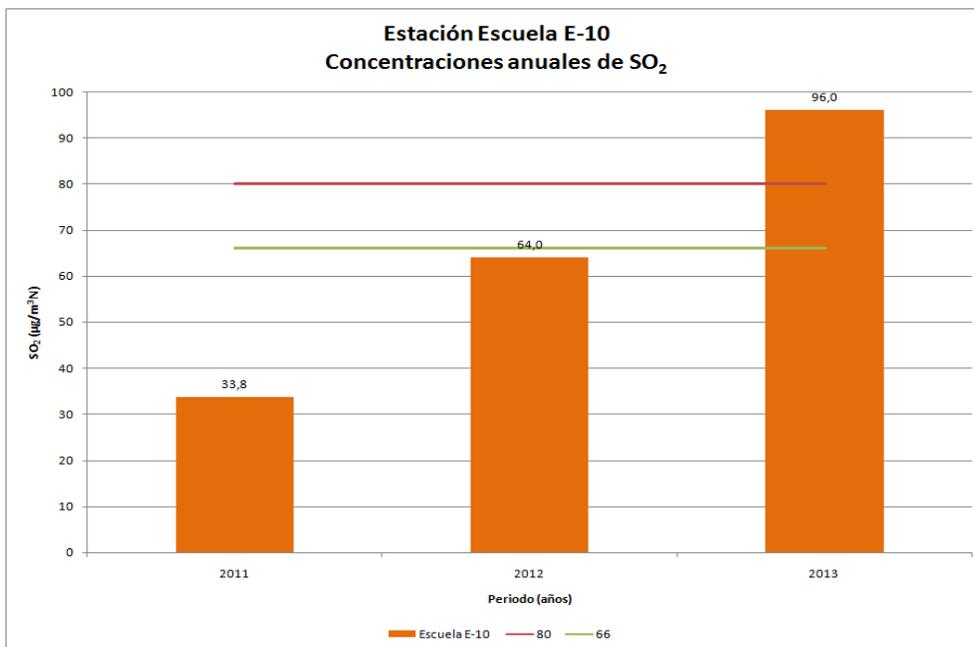


**Figura 187. Superación de valores propuestos para la norma diaria estación junji, Hualpén**

La figura anterior muestra que, si bien es cierto que desde el año 2011 no hay superación para el escenario de  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , se observa un aumento en los otros escenarios en el mismo periodo.

## Situación de superación de niveles de SO<sub>2</sub>, resolución anual

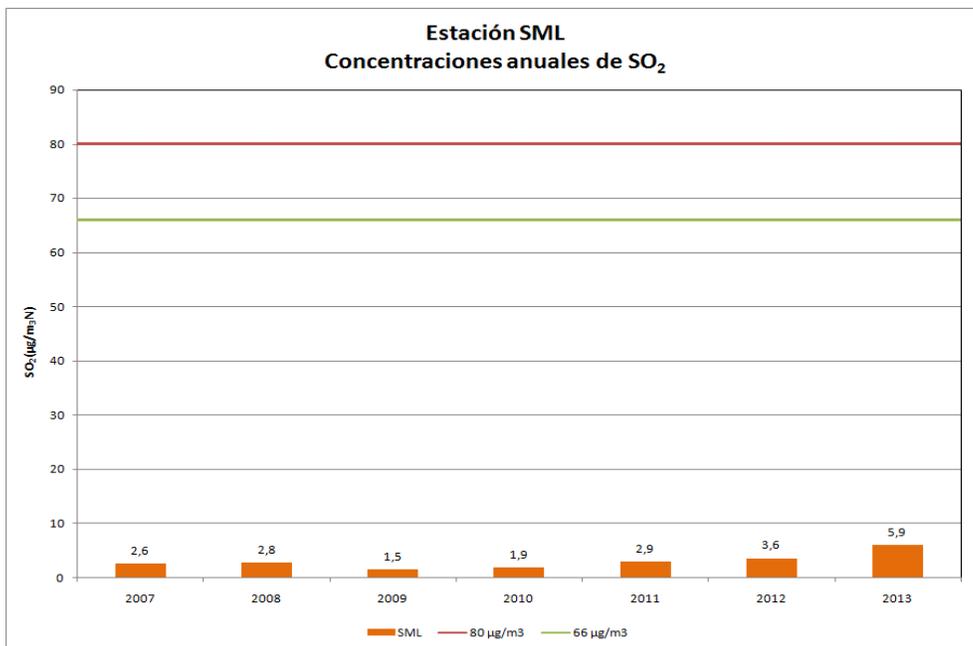
### i) Tocopilla



**Figura 188. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Escuela E-10, Tocopilla**

La figura anterior muestra un aumento desde el año 2011, superando los escenarios propuestos en el año 2013. La tendencia de las concentraciones anuales es al aumento en el periodo estudiado.

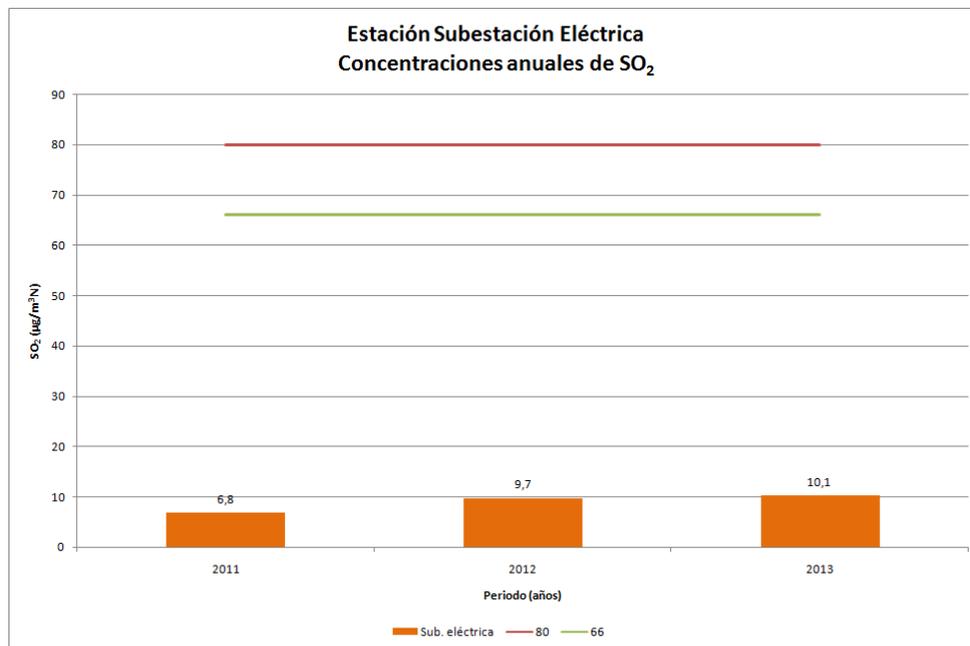
**ii) Calama, estación SML**



**Figura 189. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SML, Calama**

A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

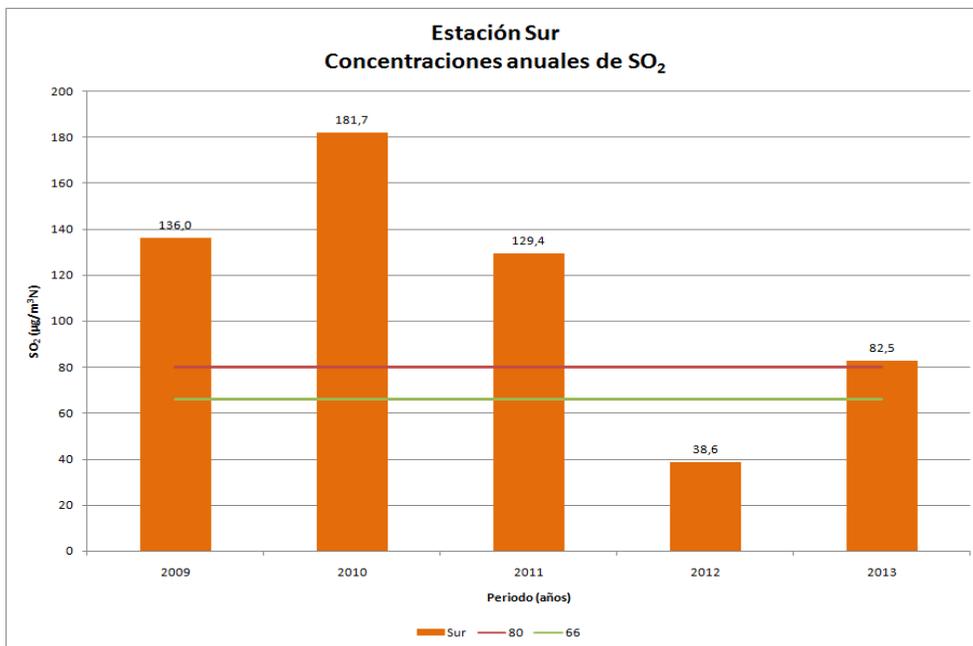
### iii) Mejillones



**Figura 190. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Subestación Eléctrica, Mejillones**

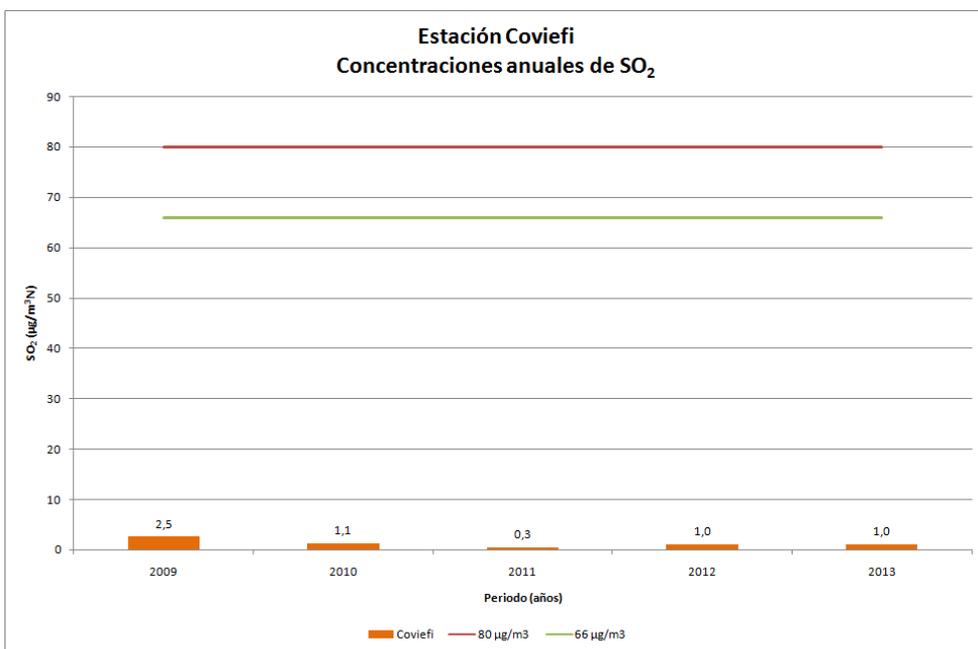
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de  $\text{SO}_2$  se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

iv) Antofagasta – La Negra (Sur y Coviefi)



**Figura 191. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Sur, La Negra**

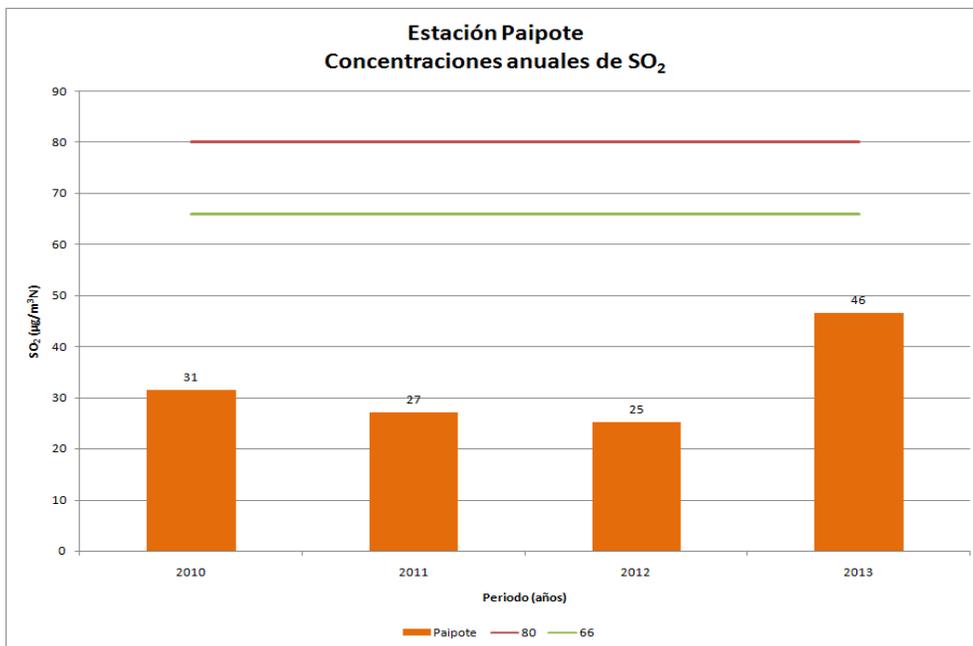
En la figura anterior se observa que sólo el año 2012 el valor del promedio anual se encuentra bajo los escenarios propuestos, para los otros años estudiados, la concentración promedio anual supera los escenarios regulatorios propuestos.



**Figura 192. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Coviefi, Antofagasta**

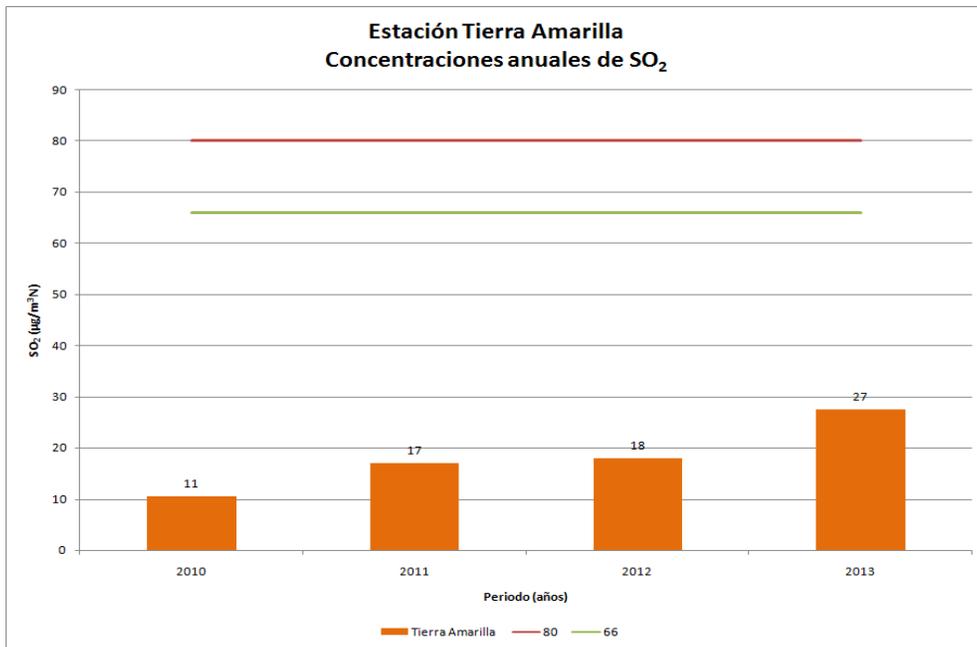
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

v) Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Paipote y Tierra Amarilla)



**Figura 193. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Paipote, Paipote**

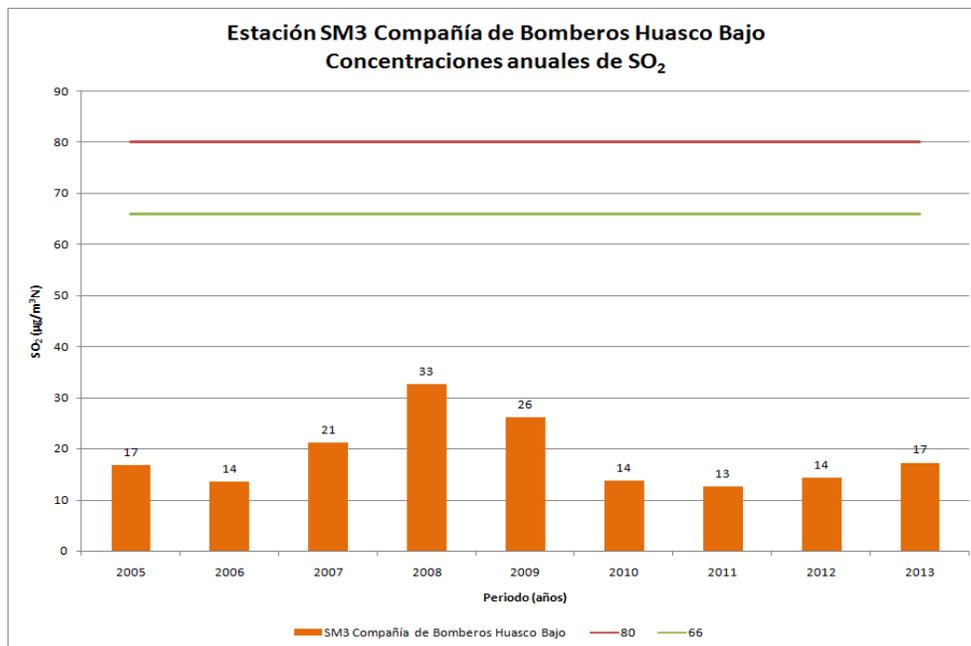
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.



**Figura 194. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Tierra Amarilla, Tierra Amarilla**

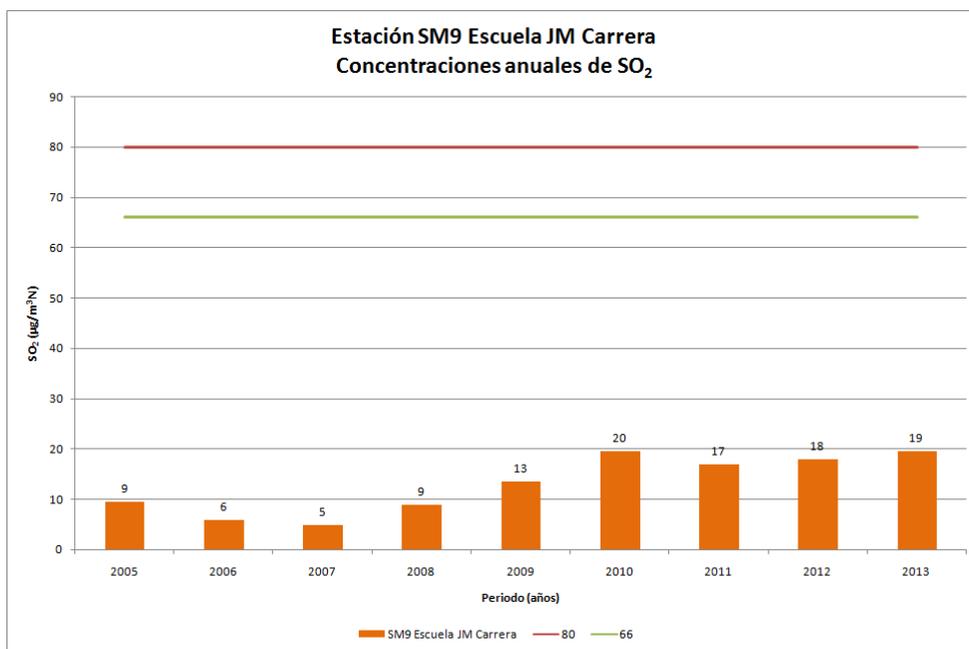
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

vi) Huasco (SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo y SM9 Escuela JM Carrera)



**Figura 195. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo, Huasco**

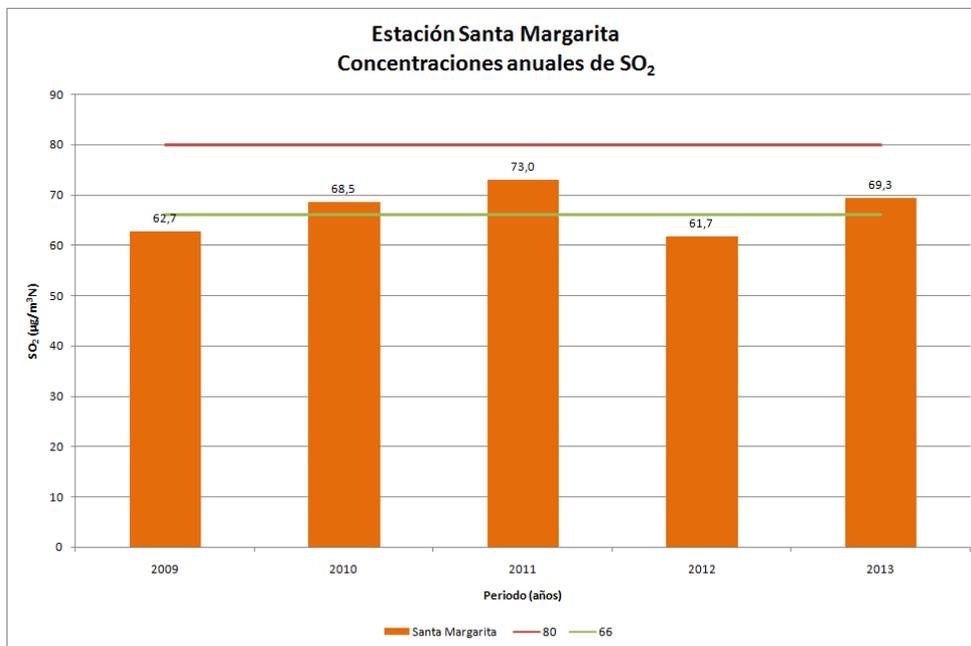
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.



**Figura 196. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación SM9 Escuela JM Carrera, Huasco**

A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran muy por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

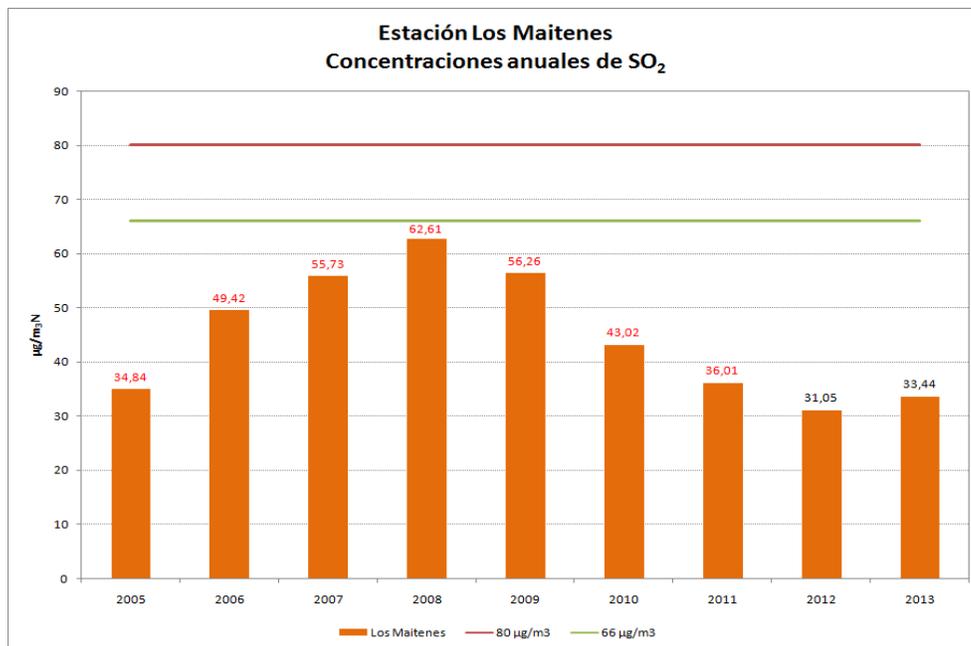
**vii) Catemu – Llay Llay**



**Figura 197. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Santa Margarita, Catemu – Llay Llay**

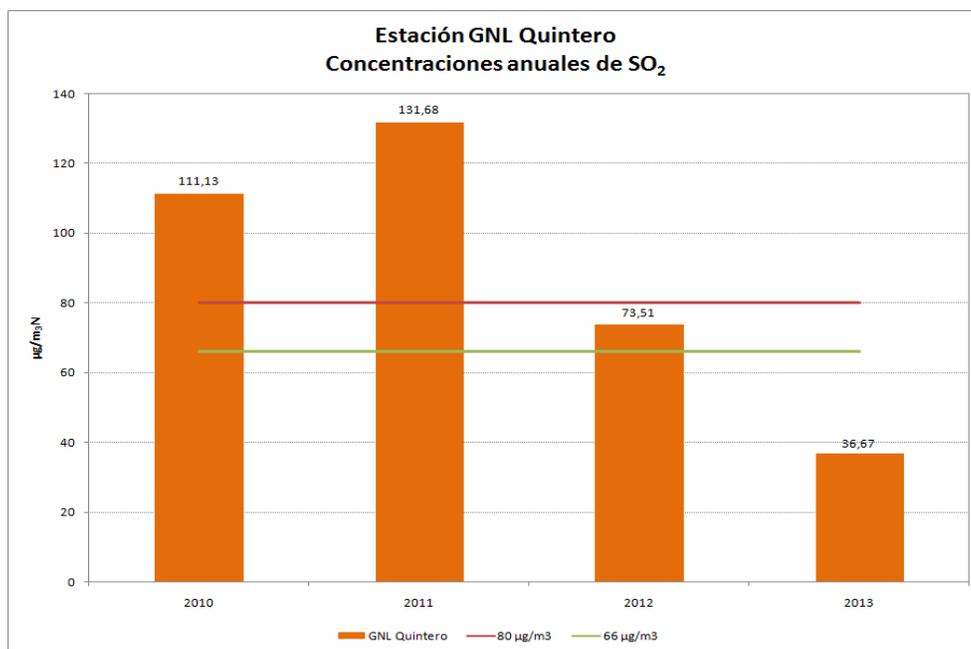
Se observa en la figura anterior que sólo el 2009 y 2012 se encuentran bajo los valores propuestos. Los años 2010, 2011 y 2013 superan los dos escenarios regulatorios propuestos.

**viii) Quintero – Puchuncaví (Los Maitenes y GNL Quintero)**



**Figura 198. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Los Maitenes, Quintero - Puchuncaví**

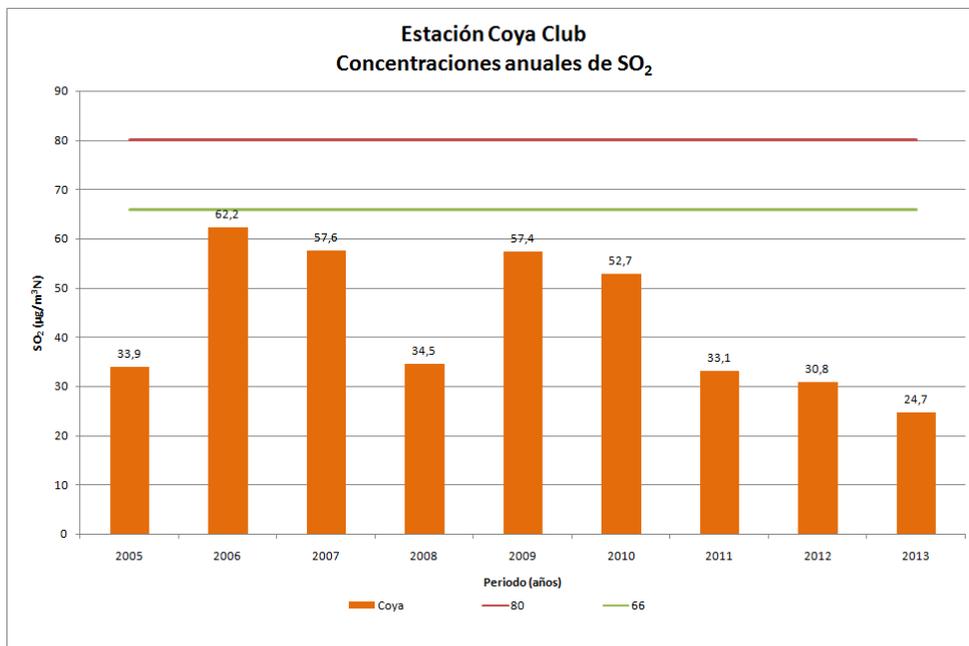
A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran por debajo de los escenarios de norma anual propuestos. Solo los años 2012 y 2013 cumplen con el requisito del 75% de los datos válidos para el cálculo del promedio, no obstante, los años 2005 a 2011 se muestran igualmente, de modo referencial, a modo de comparación entre las concentraciones y los escenarios regulatorios propuestos.



**Figura 199. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación GNL Quintero, Quintero - Puchuncaví**

En la figura anterior se observa que sólo el 2013 se encuentra bajo los valores propuestos. Los promedios anuales de concentraciones de los años 2010, 2011 y 2012 superan los escenarios regulatorios propuestos.

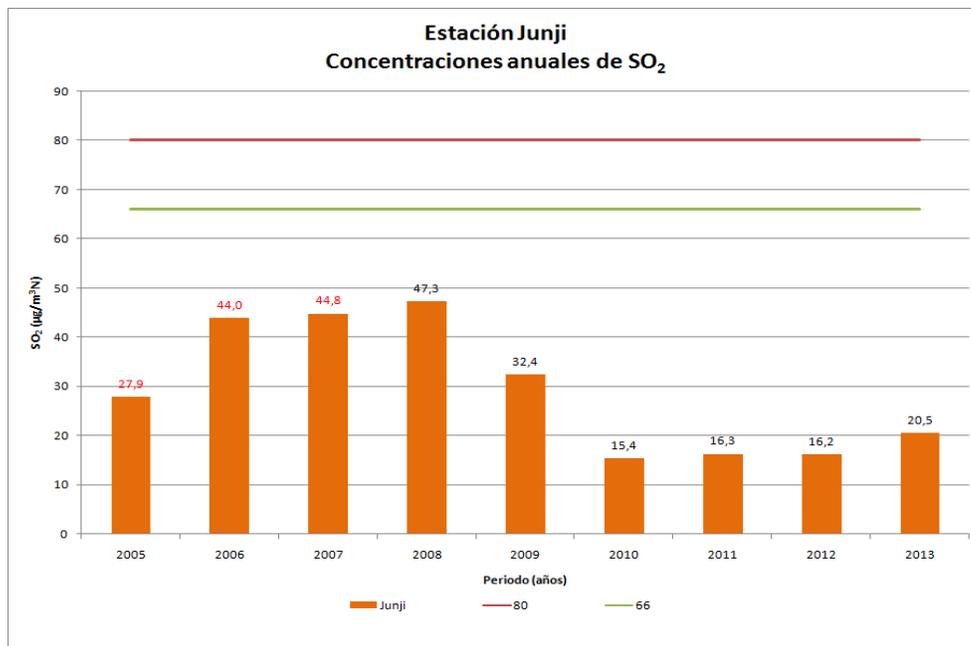
ix) Machalí – Coya



**Figura 200. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Coya Club, Machalí - Coya**

A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

**x) Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano**



**Figura 201. Concentraciones anuales y escenarios regulatorios propuestos estación Junji, Hualpén**

A partir de la figura anterior se desprende que los valores de SO<sub>2</sub> se encuentran por debajo de los escenarios de norma anual propuestos.

### 5.2.3. Conclusiones

Como conclusiones de la comparación de las concentraciones con los escenarios normativos propuestos se entregan cuatro tablas resumen donde es posible observar la cantidad de superaciones de cada estación considerada en el análisis respecto del escenario evaluado.

La Tabla 56 resume la cantidad de horas que se superan los escenarios normativos propuestos para esta resolución en cada una de las estaciones seleccionadas en las zonas priorizadas. El resultado se entrega en número de horas y en porcentaje de horas en relación con el total de horas válidas entre los años 2011 y 2013.

Se observa que el nivel más estricto ( $197 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) es el nivel que se supera mayormente. En el año 2013 en la estación Escuela E-10 en Tocopilla, se superó en un 15% de las horas. En promedio durante el año 2013 se superó en un 4,2% de las veces a nivel país. En cuanto al escenario intermedio de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , se superó en promedio 1,6% de las horas en todas las zonas, y se superó mayormente en la estación Sur de Antofagasta, con un 6,6% de las horas. En cuanto al escenario más permisivo,  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , se supera solamente en un 0,8% de las horas, en promedio en todas las zonas en el año 2013, siendo la máxima la estación Sur con un 4,4%.

La Tabla 57 resume la cantidad de días que se superan los escenarios normativos propuestos para esta resolución en cada una de las estaciones seleccionadas en las zonas priorizadas. El resultado se entrega en número de días y en porcentaje de días en relación con el total de días válidos entre los años 2011 y 2013.

Se observa que el nivel más estricto ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) es el nivel que se supera mayormente. En el año 2013 en la estación Escuela E-10 en Tocopilla, se superó en un 94,2% de los días, coincidiendo con el resultado de la resolución horaria. En promedio durante el año 2013 se superó en un 46,2% de los días a nivel país. En cuanto al escenario intermedio de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , se superó en promedio en un 23% de los días en todas las zonas, y se superó mayormente en la estación Escuela E-10 de Tocopilla, con un 72,5% de los días. En cuanto al escenario más permisivo,  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , se supera solamente en un 5,2% de los días, en promedio en todas las zonas en el año 2013, siendo la máxima la estación Escuela E-10 con un 27,2%.

La Tabla 58 muestra las concentraciones anuales de  $\text{SO}_2$  para la(s) peor(es) estación(es) por zona en cuanto a sus promedios de concentraciones.

En los promedios anuales es posible distinguir que las estaciones presentan promedios de dos dígitos (decenas) no muestran tanta variación al comparar con los promedios de otros años. Sin embargo, las estaciones que presentan promedios de tres dígitos (centenas) muestran gran variación al comparar con los promedios de otros años.

Las estaciones que son notorias al observar los promedios trianuales de concentraciones de  $\text{SO}_2$  son la estación E-10 (zona Tocopilla), estación Sur (zona Antofagasta – La Negra), estación Santa Margarita (zona Catemu – Llay Llay) y estación GNL Quintero (zona Quintero – Puchuncaví), con valores de 64,6, 83,5, 68,0 y 80,6  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , respectivamente.

**Tabla 56. Resumen de horas que superan los valores límite propuestos para la norma horaria periodo 2011-2013**

Escenario Norma Horaria														
Zona	Estación	Hora / %	2011				2012				2013			
			197	350	500	n	197	350	500	n	197	350	500	n
Tocopilla	Escuela E-10	Horas	162	35	9	8309	615	200	85	8664	1300	453	179	8647
		%	1.9	0.4	0.1		7.1	2.3	1.0		15.0	5.2	2.1	
Calama	SML	Horas	1	0	0	9230	3	0	0	7915	12	2	2	8400
		%	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0	
Mejillones	Sub. Eléctrica	Horas	5	0	0	8588	17	5	1	8711	10	0	0	8692
		%	0.1	0.0	0.0		0.2	0.1	0.0		0.1	0.0	0.0	
Antofagasta	Sur	Horas	1454	772	520	8760	461	285	195	8783	940	575	381	8756
		%	16.6	8.8	5.9		5.2	3.2	2.2		10.7	6.6	4.4	
	Coviefi	Horas	0	0	0	8753	16	4	3	8783	6	2	0	8566
		%	0.0	0.0	0.0		0.2	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0	
Copiapó	Paipote	Horas	321	142	74	8665	327	154	85	8645	621	365	242	8675
		%	3.7	1.6	0.9		3.8	1.8	1.0		7.2	4.2	2.8	
	Tierra Amarilla	Horas	155	49	18	8690	187	79	36	8714	320	132	60	7980
		%	1.8	0.6	0.2		2.1	0.9	0.4		4.0	1.7	0.8	
Huasco	SM3 Comp. de Bomb. H. Bajo	Horas	28	2	0	8570	45	4	0	8680	48	6	3	8605
		%	0.3	0.0	0.0		0.5	0.0	0.0		0.6	0.1	0.0	
	SM9 E. JJ Carrera	Horas	34	6	0	8620	71	11	2	8670	69	13	3	8602
		%	0.4	0.1	0.0		0.8	0.1	0.0		0.8	0.2	0.0	
Catemu	Santa Margarita	Horas	996	200	34	8520	719	11	23	8548	883	144	20	8574
		%	11.7	2.3	0.4		8.4	0.1	0.3		10.3	1.7	0.2	
Quintero - Puchuncaví	Los Maitenes	Horas	271	88	31	6425	228	58	12	7612	296	92	34	8627
		%	4.2	1.4	0.5		3.0	0.8	0.2		3.4	1.1	0.4	
	GNL	Horas	1203	819	585	8283	761	481	316	8415	284	121	53	8509
		%	14.5	9.9	7.1		9.0	5.7	3.8		3.3	1.4	0.6	
Coya	Coya Club	Horas	446	164	53	8677	395	108	29	8664	259	61	14	8492
		%	5.1	1.9	0.6		4.6	1.2	0.3		3.0	0.7	0.2	
Hualpén	Junji	Horas	10	0	0	8626	6.0	0.0	0.0	8290	24	1	0	8332
		%	0.1	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0		0.3	0.0	0.0	

**Tabla 57. Resumen de días que superan los valores límite propuestos para la norma diaria periodo 2011-2013**

Escenario Norma Diaria														
Zona	Estación	Días / %	2011				2012				2013			
			20	50	125	n	20	50	125	n	20	50	125	n
Tocopilla	Escuela E-10	Días	240	66	5	344	309	192	39	364	343	264	99	364
		%	69.8	19.2	1.5		84.9	52.7	10.7		94.2	72.5	27.2	
Calama	SML	Días	2	0	0	357	3	0	0	363	14	1	0	350
		%	0.6	0.0	0.0		0.8	0.0	0.0		4.0	0.3	0.0	
Mejillones	Sub. Eléctrica	Días	15	0	0	360	30	5	0	366	35	2	0	365
		%	4.2	0.0	0.0		8.2	1.4	0.0		9.6	0.5	0.0	
Antofagasta	Sur	Días	300	267	153	365	195	103	21	366	319	218	71	365
		%	82.2	73.15	41.92		53.3	28.1	5.7		87.4	59.7	19.5	
	Coviefi	Días	0	0	0	364	6	2	0	366	2	0	0	356
		%	0.0	0.0	0.0		1.6	0.5	0.0		0.6	0.0	0.0	
Copiapó	Paipote	Días	136	54	15	365	126	54	12	366	167	108	42	365
		%	37.3	14.8	4.1		34.4	14.8	3.3		45.8	29.6	11.5	
	Tierra Amarilla	Días	109	19	1	365	115	24	1	366	148	63	6	337
		%	29.9	5.2	0.3		31.4	6.6	0.3		43.9	18.7	1.8	
Huasco	SM3 Comp. de Bomb. H. Bajo	Días	55	2	0	361	74.0	4.0	0.0	364	110	8	0	365
		%	15.2	0.6	0.0		20.3	1.1	0.0		30.1	2.2	0.0	
	SM9 E. JJ Carrera	Días	121	4	0	362	110	14	0	364	119	16	0	364
		%	33.4	1.1	0.0		30.2	3.8	0.0		32.7	4.4	0.0	
Catemu	Santa Margarita	Días	315	257	44	365	303.0	227.0	20.0	362	324	252	23	363
		%	86.3	70.4	12.1		83.2	62.4	5.5		89.3	69.4	6.3	
Quintero - Puchuncaví	Los Maitenes	Días	174	60	9	268	192	52	1	319	241	63	6	360
		%	64.9	22.4	3.4		60.2	16.3	0.3		66.9	17.5	1.7	
	GNL	Días	277	210	115	346	201	131	64	349	226	81	8	350
		%	80.1	60.7	33.2		57.6	37.5	18.34		64.6	23.1	2.3	
Coya	Coya Club	Días	138	82	23	359	138	74	19	349	128	61	10	340
		%	38.4	22.8	6.4		39.5	21.2	5.4		37.6	17.9	2.9	
Hualpén	Junji	Días	97	14	0	362	96	19	0	342	136	22	0	344
		%	26.8	3.9	0.0		28.1	5.6	0.0		39.5	6.4	0.0	

**Tabla 58. Promedio anuales de concentraciones de SO<sub>2</sub> por zona y estación, periodo 2011-2013.**

Escenario Norma Anual					
Año		2011	2012	2013	Promedio
Zona	Estación	µg/m <sup>3</sup> N	µg/m <sup>3</sup> N	µg/m <sup>3</sup> N	µg/m <sup>3</sup> N
<b>Tocopilla</b>	E-10	33.8	64.0	96.0	<b>64.6</b>
<b>Calama</b>	SML	2.9	3.6	5.9	<b>4.1</b>
<b>Mejillones</b>	Sub. Eléctrica	6.8	9.7	10.1	<b>8.9</b>
<b>Antofagasta – La Negra</b>	Sur	129.4	38.6	82.5	<b>83.5</b>
	Coviefi	0.3	1.0	1.0	<b>0.8</b>
<b>Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla</b>	Paipote	27.1	25.2	46.4	<b>32.9</b>
	Tierra Amarilla	16.9	17.9	27.4	<b>20.7</b>
<b>Huasco</b>	SM3 Comp. Bomberos H. Bajo	12.6	14.4	17.3	<b>14.7</b>
	SM9 Escuela JJ Carrera	16.9	17.9	19.5	<b>18.1</b>
<b>Catemu – Llay Llay</b>	Santa Margarita	73.0	61.7	69.3	<b>68.0</b>
<b>Quintero – Puchuncaví</b>	Los Maitenes	36.0	31.1	33.4	<b>33.5</b>
	GNL Quinteros	131.7	73.5	36.7	<b>80.6</b>
<b>Machalí – Coya</b>	Coya Club	33.1	30.8	24.7	<b>29.5</b>
<b>Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano</b>	Junji	16.3	16.2	20.5	<b>17.7</b>

**Tabla 59. N° de horas que han superado los umbrales de concentración de SO<sub>2</sub> vigentes para normativa chilena. Periodo 2011 – 2013.**

Año		2011				2012				2013			
Zona	Estación	1962	2616	3924	n	1962	2616	3924	n	1962	2616	3924	n
Tocopilla	E-10	0	0	0	8309	0	0	0	8664	0	0	0	8647
Calama	SML	0	0	0	9230	0	0	0	7915	0	0	0	8400
Mejillones	Subestación Eléctrica	0	0	0	8588	0	0	0	8711	0	0	0	8692
Antofagasta – La Negra	Sur	34	14	3	8760	9	1	0	8783	20	4	0	8756
	Coviefi	0	0	0	8753	0	0	0	8783	0	0	0	8566
Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla	Paipote	4	2	1	8665	3	2	0	8645	6	2	1	8675
	Tierra Amarilla	1	1	0	8690	0	0	0	8714	1	0	0	7980
Huasco	SM3	0	0	0	8570	0	0	0	8680	0	0	0	8602
	SM9	0	0	0	8620	0	0	0	8670	0	0	0	8602
Catemu – Llay Llay	Santa Margarita	0	0	0	8520	0	0	0	8548	0	0	0	8574
Quintero – Puchuncaví	Los Maitenes	0	0	0	6452	0	0	0	7612	0	0	0	8627
	GNL Quintero	65	31	7	8283	14	7	0	8415	0	0	0	8509
Machalí – Coya	Coya Club	0	0	0	8677	0	0	0	8664	0	0	0	8492
Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano	Junji	0	0	0	8626	0	0	0	8290	0	0	0	8332

En la Tabla 59 muestra la cantidad de horas en las que se superó los umbrales de la normativa que actualmente se aplica en Chile, cuyos niveles de situación de emergencia en concentraciones de una hora son:

- Nivel 1: 1962 – 2615  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$
- Nivel 2: 2616 – 3923  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$
- Nivel 3: 3924  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  o superior.

Se destaca la estación Sur de la zona Antofagasta – La Negra al evaluar el año 2011 con 34 superaciones de norma para el nivel 1, 14 superaciones de norma para el nivel 2 y 3 superaciones de norma para el nivel 3. Al evaluar el año 2012 se obtienen 9 superaciones de norma para el nivel 1, 1 superaciones de norma para el nivel 2 y ninguna superación de norma para el nivel 3. Para el año 2013 se obtienen 20

superaciones de norma para el nivel 1, 4 superaciones de norma para el nivel 2 y ninguna superación de norma para el nivel 3.

Se destaca la estación GNL Quintero de la zona Quintero – Puchuncaví al evaluar el año 2011 con 65 superaciones de norma para el nivel 1, 31 superaciones de norma para el nivel 2 y 7 superaciones de norma para el nivel 3. Al evaluar el año 2012 se obtienen 14 superaciones de norma para el nivel 1, 7 superaciones de norma para el nivel 2 y ninguna superación de norma para el nivel 3. Para el año 2013 no se obtienen superaciones de norma.

## 5.3. Evaluación de los riesgos a la salud por la exposición al SO<sub>2</sub>

### 5.3.1. Resumen

La aplicación de los valores AEGL en una evaluación del riesgo a la salud que presenta la población producto de la exposición aguda a concentraciones de SO<sub>2</sub> se explica en esta sección.

Se realizó la comparación de los niveles de SO<sub>2</sub> medidos en cada una de las estaciones de monitoreo priorizadas empleando los AEGLs como nivel de referencia.

**Tabla 60: Número de veces en que el SO<sub>2</sub> excedió un respectivo AEGL**

Localidad		Año de Monitoreo	Frecuencia temporal	[SO <sub>2</sub> ] que excede el Nivel de Referencia		
Zona	Estación			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
Tocopilla	Escuela E10	2011	1 h	7	0	0
		2012		72	0	0
		2013		162	0	0
Calama	Estación SML	2007	10 min	0	0	0
		2008		4	0	0
		2009		6	0	0
		2010		13	0	0
		2011		2	0	0
		2012		0	0	0
Mejillones	Sub Estación Eléctrica	2011	1 hora	0	0	0
		2012		1	0	0
		2013		0	0	0
Antofagasta	Estación Sur	2009	10 min	3568	585	0
		2010		3750	1031	0
		2011		2822	352	0
		2012		1188	126	0
		2013		2199	225	0
Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla	Paipote	2010	10 min	562	57	0
		2011		463	32	0
		2012		533	32	0
		2013		1355	89	0
Copiapó-	Tierra Amarilla	2010	10 min	84	1	0

Localidad		Año de Monitoreo	Frecuencia temporal	[SO <sub>2</sub> ] que excede el Nivel de Referencia		
Zona	Estación			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
Paipote-Tierra Amarilla		2011		142	9	0
		2012		233	3	0
		2013		370	9	0
Huasco	SM3 Segunda Compañía de Bomberos	2005	1 hora	0	0	0
		2006		0	0	0
		2007		1	0	0
		2008		0	0	0
		2009		0	0	0
		2010		0	0	0
		2011		0	0	0
		2012		0	0	0
Huasco	SM9 Escuela JM Carrera	2005	1 hora	1	0	0
		2006		0	0	0
		2007		0	0	0
		2008		1	0	0
		2009		6	0	0
		2010		2	0	0
		2011		0	0	0
		2012		2	0	0
		2013		2	0	0
Catemu-Llay Llay	Santa Margarita	2009	10 min	208	0	0
		2010		326	2	0
		2011		388	3	0
		2012		222	2	0
		2013		242	0	0
Quintero-Puchuncaví	Los Maitenes	2005	10 min	284	3	0
		2006		570	10	0
		2007		756	17	0
		2008		857	21	0
		2009		692	5	0
		2010		346	21	0
		2011		279	2	0

Localidad		Año de Monitoreo	Frecuencia temporal	[SO <sub>2</sub> ] que excede el Nivel de Referencia		
Zona	Estación			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
		2012		156	21	0
		2013		266	1	0
Quinteros-Puchuncaví	GNL Quintero	2010	10 min	62	2	0
		2011		176	50	0
		2012		281	12	0
		2013		325	16	0
Coya-Machalí	Coya Club	2005	10 min	652	2	0
		2006		1480	4	0
		2007		1418	0	0
		2008		641	0	0
		2009		1052	0	0
		2010		1052	0	0
		2011		310	0	0
		2012		175	0	0
Coronel-Lota-Huelpén	Junji	2005	1 hora	6	0	0
		2006		0	0	0
		2007		6	0	0
		2008		5	0	0
		2009		4	0	0
		2010		1	0	0
		2011		0	0	0
		2012		0	0	0
		2013		0	0	0

Es fundamental disponer de las concentraciones del contaminante en el aire en acotadas medidas temporales debido a las características toxicológicas del SO<sub>2</sub> (efectos agudos) y no aplica determinar una única concentración promedio representativa como en el caso de efectos crónicos.

No se identificó un procedimiento para el cálculo de la dosis de exposición aguda de SO<sub>2</sub> por inhalación. Se compara la concentración aérea de SO<sub>2</sub> con los Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGLs).

La influencia de niveles AEGL-1 descrito como la concentración que provoca molestia en la población y efectos pasajeros; o sea, perceptibles, fueron detectados en el 58% de los escenarios estudiados durante el último año.

Se detectaron niveles superiores al AEGL-2 en 5 escenarios analizados durante el año 2013, valor considerado discapacitante para la población general, incluyendo receptores susceptibles tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades.

No fueron detectados eventos de superación del AEGL-3.

### **5.3.2. Generalidades**

El análisis de riesgo permite generar información requerida para la toma de decisiones relacionadas con la prevención, disminución, o control del riesgo que presentan los niveles de SO<sub>2</sub> en el aire a nivel país. En primer lugar, la estimación del riesgo permite obtener una perspectiva acerca de las diferentes fuentes y naturaleza de riesgo, y tener evidencia acerca de las contribuciones de las fuentes, los contaminantes, y las vías de exposición, respecto del índice de peligrosidad total. En segundo lugar la estimación de riesgo permite identificar los riesgos máximos para una variedad de receptores humanos sujetos a diversos escenarios de exposición. En tercer lugar el análisis de riesgo provee las bases de un marco sistemático usado para definir los recursos óptimos para evitar o controlar los riesgos, en particular de riesgos futuros.

La evaluación de los riesgos en la salud es un proceso científico que se usa para estimar la probabilidad de que se manifiesten efectos en la salud de las personas como consecuencia de una exposición a sustancias químicas peligrosas.

### **5.3.3. Metodología**

La implementación de una metodología de evaluación de riesgo considera la evaluación de tres factores: el grado de contaminación del ambiente, la exposición presente y/o futura de la población afectada y los posibles efectos biológicos en la población y los ecosistemas presentes.

### **5.3.4. Caracterización de la exposición**

#### **Punto de contacto o punto de exposición entre contaminante y receptor**

Para que exista exposición, debe concurrir simultáneamente el contaminante en una concentración que pueda ser cuantificable, en una matriz ambiental identificable y un receptor humano. Además debe haber una probabilidad cierta de ocurrencia temporal y espacial del contacto físico entre el contaminante y el receptor humano, es decir el punto de contacto entre un contaminante y el receptor humano debe ser plausible y medible.

Es en este punto donde ocurre la exposición en función de la duración, magnitud, y absorción del contaminante. El punto de contacto, entonces, es el lugar (real o

hipotético) donde ocurre (o puede ocurrir) el contacto de un contaminante, típicamente presente en una matriz ambiental (aire, agua, suelo) con el organismo, por una ruta de exposición (oral, dérmica, respiración).

Para identificar estos puntos de contacto se deben considerar todos los aportes desde los antecedentes, acorde a la descripción del fenómeno ambiental en estudio. Esto es, considerar los patrones meteorológicos y su aporte a la dispersión de contaminantes para seleccionar las zonas donde con mayor probabilidad se desplacen los mismos según la circulación de las masas de aire.

Para este estudio, se ha identificado como punto donde existe mayor probabilidad de que los contaminantes tengan contacto con receptores humanos genéricos los siguientes:

**Tabla 61: Puntos de contacto identificados para receptores genéricos**

Ruta de exposición	Punto de contacto	Ejemplos de punto de contacto
Inhalación	Cualquier lugar donde los receptores respiran y durante ese proceso, inhalan SO <sub>2</sub> , que van a los pulmones.	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Aire interior habitación residencial.</li> <li>➤ Aire de la sala de clases</li> <li>➤ Aire exterior a una vivienda</li> <li>➤ Aire en un campo deportivo</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### Ubicación de las estaciones de monitoreo

Para el presente estudio se dispone de los datos provenientes de 53 estaciones de monitoreo ubicadas en 10 zonas a lo largo del país (Tabla 62).

### Concentración representativa de SO<sub>2</sub>

Debido a las características toxicológicas del SO<sub>2</sub> (efectos agudos) es fundamental disponer de las concentraciones del contaminante en el aire para cada punto de exposición en acotadas medidas temporales y no aplica determinar una única concentración promedio representativa como en el caso de efectos crónicos. Es por ello que para cada una de las estaciones seleccionadas se evaluarán las concentraciones promedio de SO<sub>2</sub> en registradas en ellas, cuando sea posible en periodos de 10 minutos.

Del total de estaciones disponible se priorizaron aquellas que presentaron las mayores concentración de SO<sub>2</sub> en cada sector (percentil 99) considerando el promedio de los últimos 3 años monitoreados en cada caso (destacadas en la Tabla 62).

**Tabla 62. Concentración de SO<sub>2</sub> en Estaciones de Monitoreo**

Zona	Estación	Percentil 99 SO <sub>2</sub> promedio horario	
		Promedio Total	3 últimos años
TOCOPILLA	<b>Escuela - E10</b>	<b>457.1</b>	<b>457.1</b>
	Gobernación	68.4	67.8
CALAMA	Hospital	45.3	46.6
	<b>SML</b>	<b>40.4</b>	<b>53.8</b>
MEJILLONES	Ferrocarril	45.7	45.7
	JJ Latorre	72.2	72.2
	<b>Sub Electrica</b>	<b>90.4</b>	<b>90.4</b>
ANTOFAGASTA - LA NEGRA	Coviefi	22.0	12.0
	Norte	139.6	185.8
	<b>Sur</b>	<b>1745.9</b>	<b>1156.6</b>
COPIAPÓ - PAIPOTE - TIERRA AMARILLA	Copiapó	98.0	111.0
	Los Volcanes	170.6	202.7
	Pabellón	85.3	95.8
	<b>Paipote</b>	<b>585.1</b>	<b>606.6</b>
	San Fernando	84.3	96.5
	<b>Tierra Amarilla</b>	<b>307.8</b>	<b>348.5</b>
HUASCO	SM1 Vertedero	128.8	130.2
	SM2 Quinta La Rosa	121.5	71.7
	<b>SM3 Cia Bomberos Huasco Bajo</b>	<b>164.4</b>	<b>151.5</b>
	SM4 Carretera Km 40	142.1	140.8
	SM5 Parcela 5	134.7	125.9
	SM6 Parcela B. Esperanza	124.0	122.2
	SM7 Los Loros	149.9	121.3
	SM8 Freirina	91.9	107.8
	<b>SM9 Escuela JMC</b>	<b>147.3</b>	<b>168.5</b>
	SM10 Cuerpo Bomberos	142.9	157.8
CATEMU - LLAY LLAY	Catemu	97.3	94.9
	Lo Campo	229.0	238.3
	<b>Santa Margarita</b>	<b>394.5</b>	<b>397.9</b>
	Romeral	117.5	119.0
QUINTERO - PUCHUNCAVÍ	La Greda	252.3	192.8
	<b>Los Maitenes</b>	<b>488.8</b>	<b>357.0</b>
	Puchuncaví	180.8	135.0
	Quintero	260.8	347.0
	Sur	348.7	246.0

Zona	Estación	Percentil 99 SO <sub>2</sub> promedio horario	
		Promedio Total	3 últimos años
	Valle Alegre	176.2	192.3
	Ventanas	234.5	234.5
	<b>GNL Quintero</b>	<b>1162.8</b>	<b>1058.6</b>
MACHALÍ - COYA	<b>Coya Club</b>	<b>565.2</b>	<b>378.2</b>
	Coya Población	153.9	99.6
	Cauquenes	114.8	81.8
	Cipreses	95.9	64.7
CORONEL - LOTA - HUALPÉN	<b>Junji</b>	<b>224.6</b>	<b>136.2</b>
	Inpesca	108.6	62.2
	Indura	130.7	65.2
	PRICE	98.9	91.7
	CAP	111.9	80.6
	Coronel Sur	95.4	99.6
	Coronel Norte	166.4	170.2
	Lagunillas	73.3	82.8
	Cerro Merquin	56.3	55.3
	Lota Urbana	84.1	79.9
	Lota Rural	91.3	96.9

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que debido a la extensión geográfica de algunas zonas se emplearon dos estaciones para la evaluación. Para mayor detalle ver Capítulo 2 Análisis de Antecedentes de Calidad del Aire en Chile Asociado al Dióxido de Azufre.

### 5.3.5. Escenarios de Exposición y Receptores Seleccionados

Se considera como “escenario de exposición” al área física que comprende el lugar en el cual se emiten los tóxicos al ambiente, se transportan y donde las poblaciones entran en contacto con los medios contaminantes. De esta definición se entiende que un escenario de exposición debe contener la definición de un lugar o espacio físico concreto donde puedan coexistir unos receptores con una fuente de contaminantes conectados mediante una vía de exposición. Para esto se seleccionan los receptores genéricos de interés según los usos actuales, pasados o futuros del área de estudios.

Los receptores genéricos de interés son aquellos que presentan mayor susceptibilidad, mayor exposición o que presentan alguna característica que los hace vulnerables a la exposición de los contaminantes estudiados. Para el presente estudio se consideran como receptores al público general público en general, incluyendo a individuos susceptibles o sensibles, pero no a individuos hipersusceptibles o hipersensibles.

Los escenarios (localidades) seleccionados son:

**Tabla 63: Escenarios de Exposición**

Localidad	Zona de exposición	Receptor genérico	Duración de la exposición	Condiciones de la exposición
1	Tocopilla (Estación Escuela E10)	Público general residente	10 minutos (*)	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
2	Calama (Estación SML)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
3	Mejillones (Estación Sub Eléctrica)	Público general residente	10 minutos (*)	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
4	Antofagasta (Estación Sur)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
5	Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Paipote)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
6	Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Tierra Amarilla)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
7	Huasco (Estación Cia Bomberos)	Público general residente	10 minutos (*)	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
8	Huasco (Estación Escuela JMC)	Público general residente	10 minutos (*)	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
9	Catemu-Llay Llay (Estación Santa Margarita)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos

Localidad	Zona de exposición	Receptor genérico	Duración de la exposición	Condiciones de la exposición
10	Quintero-Puchuncaví (Estación Los Maitenes)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
11	Quinteros-Puchuncaví (Estación GNL Quintero)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
12	Coya-Machalí (Estación Coya Club)	Público general residente	10 minutos	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos
13	Coronel-Lota-Huelpén (Junji)	Público general residente	10 minutos (*)	No utiliza equipos de protección personal (respiradores, guantes, botas) por lo que su piel y su nariz están en contacto con polvos

(\*) La concentración de SO<sub>2</sub> se encuentra dada en una resolución temporal de promedios de 1 hora.

### 5.3.6. Niveles de referencia para el SO<sub>2</sub>

Los métodos usados para estudiar la dosis-respuesta de exposiciones agudas son en general similares a la metodología para exposiciones crónicas, y requieren la identificación de un “efecto crítico”, y determinación de un valor comparable para tal efecto.

La revisión bibliográfica de aproximadamente 1000 publicaciones, evidenció que alrededor de 80 estudios que discuten diversos enfoques para la generación y análisis de datos de concentraciones aéreas y efectos en la salud.

Se identificaron metodologías desarrolladas por organizaciones de prestigio y con diferentes propósitos en relación con exposición de corto plazo, sin considerar niveles ocupacionales.

En el presente estudio se siguió el criterio de comparar los valores medidos con los Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGs, del inglés Acute Exposure Guideline Levels, desarrollados por el National Research Council, USA) como valores más relevantes y aplicables para su uso para los casos de emisiones aéreas de corto plazo aplicables a la población en general.

Esta metodología es relevante, sólida y aplicable para su uso en casos de emisiones aéreas en Chile. Cabe señalar que la metodología AEGL fue aplicada en un estudio elaborado para la Subsecretaría del Medio Ambiente, Marzo 2013 de evaluación de

exposición ambiental a sustancias contaminantes  $\text{SO}_2$ , presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

### 5.3.7. Bases científicas para los AEGLs

Los AEGLs (ver 4.2.3) representan valores de exposición umbrales o techo de corto plazo que tienen el propósito de proteger al público en general, incluyendo a individuos susceptibles o sensibles, pero no a individuos hipersusceptibles o hipersensibles y pueden ser aplicados a períodos de exposición de emergencia que pueden ocurrir infrecuentemente en la vida de una persona (NRC, 2010).

Concentraciones en aire por debajo un AEGL-1 representan niveles de exposición que pueden producir moderado y progresivamente aumento pero no discapacitante olor, sabor, e irritación sensorial o ciertos efectos asintomáticos no sensoriales. Con cada aumento en la concentración aérea, hay un progresivo aumento en la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los efectos descritos para cada AEGL específico. Aunque los valores AEGL representan umbrales para el público en general, incluyendo subpoblaciones susceptibles, tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades, se admite que individuos sujetos a respuestas únicas o idiosincráticas<sup>55</sup> pueden experimentar los efectos descritos a concentraciones por debajo de cada AEGL respectivo.

Los valores de AEGLs son constantes para todos los puntos de tiempo porque la bronco constricción ocurre dentro de los primeros 10 min y aumenta mínimamente o se resuelve después de los 10 minutos de exposición. Un AEGL-3 de 30 ppm ( $78000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )  $\text{SO}_2$  es esencialmente letal a los 10 minutos de exposición en una persona susceptible.

### 5.3.8. Dosis de exposición aguda por inhalación de $\text{SO}_2$

Se entiende por *dosis de exposición por inhalación de gases* a una estimación del ingreso de la sustancia exógena que ocurre por un período de tiempo por la vía respiratoria. En el caso del  $\text{SO}_2$ , este tiempo está definido por la aparición de vasoconstricción bronquial en las vías respiratorias altas, proceso que tiene lugar alrededor de los primeros tres minutos siguientes al comienzo de la exposición al  $\text{SO}_2$ . Típicamente, una exposición por inhalación cubre desde horas a días.

La dosis inhalada es difícil de determinar comparada con otras rutas de exposición. En inhalación, la dosis entregada depende de la concentración de exposición, tamaño de la partícula, y patrón de respiración, entre otros factores.

---

<sup>55</sup> Particular, singular.

En la revisión bibliográfica no identificamos ningún artículo que describiera un procedimiento para el cálculo de la dosis de SO<sub>2</sub> por inhalación. Esto no es sorprendente, ya que:

- La USEPA ha discontinuado la metodología que usaba frecuencia respiratoria, puesto que no hay un criterio de toxicidad para el SO<sub>2</sub> (RfC), esto apoya el cambio de metodología de la USEPA;
- La estimación de una dosis por inhalación cuyo tiempo de exposición duraría 5 a 10 minutos, sería difícil e inexacto;
- La retención del SO<sub>2</sub> en un principio es alta, pero luego comienza a disminuir debido a la broncoconstricción, lo que hace difícil estimar la dosis por inhalación.

En el caso del SO<sub>2</sub> se lleva a cabo por comparación directa de la concentración aérea de SO<sub>2</sub> haciendo uso de los AEGLs. El análisis consiste en determinar las concentraciones (peaks de SO<sub>2</sub>) monitoreadas en cada uno de los escenarios para luego evaluar el número de veces que exceden los AEGL-1 de 200 ppb (520 µg/m<sup>3</sup>), AEGL-2 de 750 ppb (1950 µg/m<sup>3</sup>) y AEGL-3 (78000 µg/m<sup>3</sup>).

Para el SO<sub>2</sub>, la metodología AEGL mide el tiempo de aparición de efectos específicos para una concentración determinada de SO<sub>2</sub> en el aire. La aparición de broncoconstricción define el NOEL<sup>56</sup>.

Igualmente, la frecuencia y duración de la exposición de la población expuesta a SO<sub>2</sub> presentes en las zonas industriales priorizadas están determinadas por los tiempos de aplicación del SO<sub>2</sub>.

En cuanto a los factores humanos de exposición, solamente la frecuencia respiratoria depende del nivel de actividad física (reposo, practicando reposo). Los demás factores (peso corpóreo, ingesta de agua o alimentos, superficie corpórea, etc.) no tienen relación. Los factores de exposición humana para la inhalación no se aplican al concepto AEGL.

---

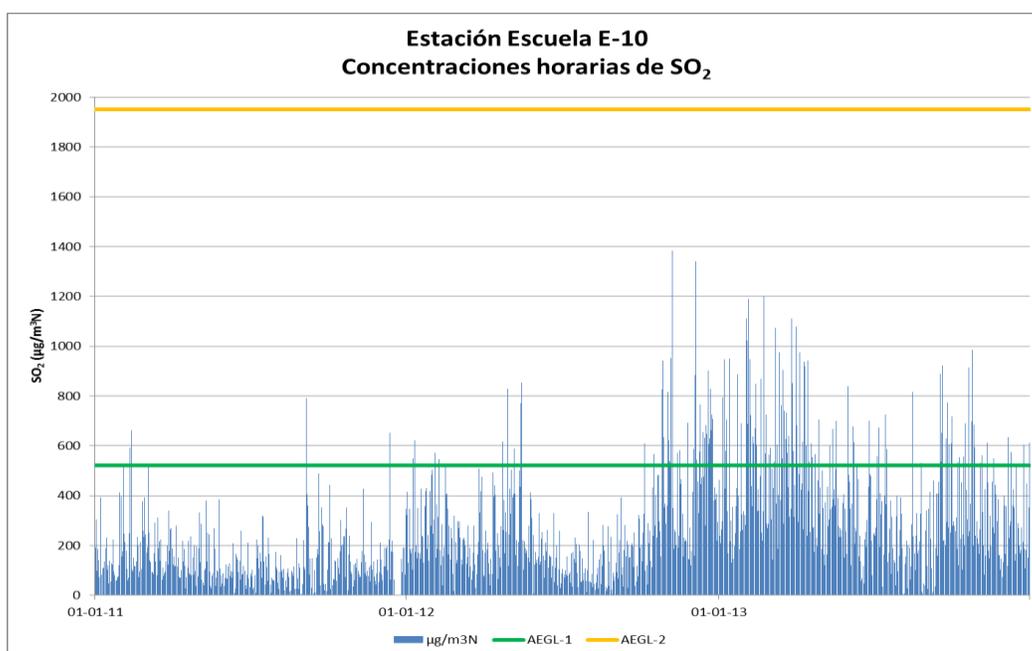
<sup>56</sup> NOEL = No-observed-effect-level, es decir, la relación concentración-tiempo para la cual presencia de SO<sub>2</sub> aéreo no es discapacitante.

### 5.3.9. Evaluación de la exposición breve para el SO<sub>2</sub>

A continuación se presenta la comparación de los niveles de SO<sub>2</sub> medidos en cada una de las estaciones de monitoreo priorizadas empleando los AEGLs como nivel de referencia.

#### Localidad 1: Tocopilla (Estación Escuela E10)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub> excedieron solo el AEGL-1 un total de 241 veces entre los años 2011 y 2013, siendo el último de estos años el con mayor recurrencia, 162 veces (Figura 202 y Tabla 64).



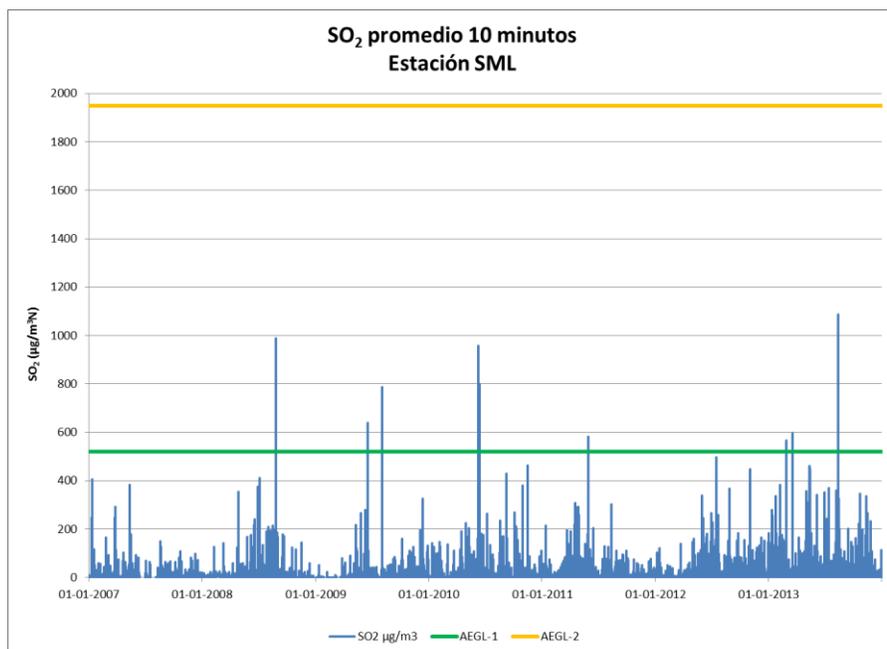
**Figura 202. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Escuela E10**

**Tabla 64: Análisis de Exposición Aguda Zona 1: Tocopilla (Estación Escuela E10)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2011	8309	1 h	7	0	0
2012	8664	1 h	72	0	0
2013	8647	1 h	162	0	0

### Localidad 2: Calama (Estación SML)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron el AEGL-1 un total de 37 veces entre los años 2007 y 2013 (Figura 203 y Tabla 65).



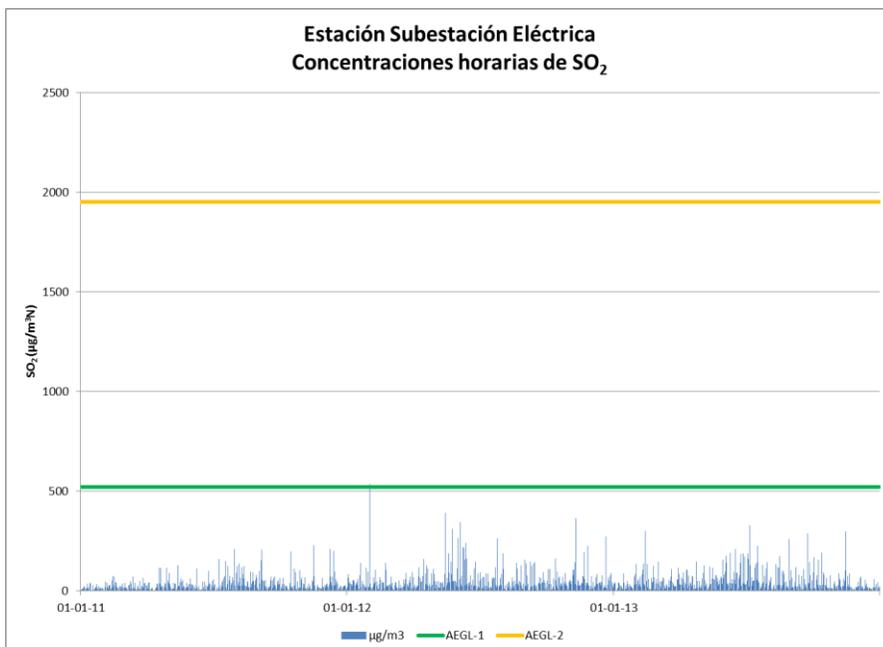
**Figura 203. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación SML**

**Tabla 65: Análisis de Exposición Aguda Zona 2: Calama (Estación SML)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2007	46640	10 min	0	0	0
2008	51320	10 min	4	0	0
2009	50967	10 min	6	0	0
2010	51248	10 min	13	0	0
2011	50943	10 min	2	0	0
2012	51985	10 min	0	0	0
2013	50537	10 min	12	0	0

### Localidad 3: Mejillones (Estación Sub Estación Eléctrica)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub> excedieron solo una vez el AEGL-1 entre los años 2011 y 2013 (Figura 204 y Tabla 66).



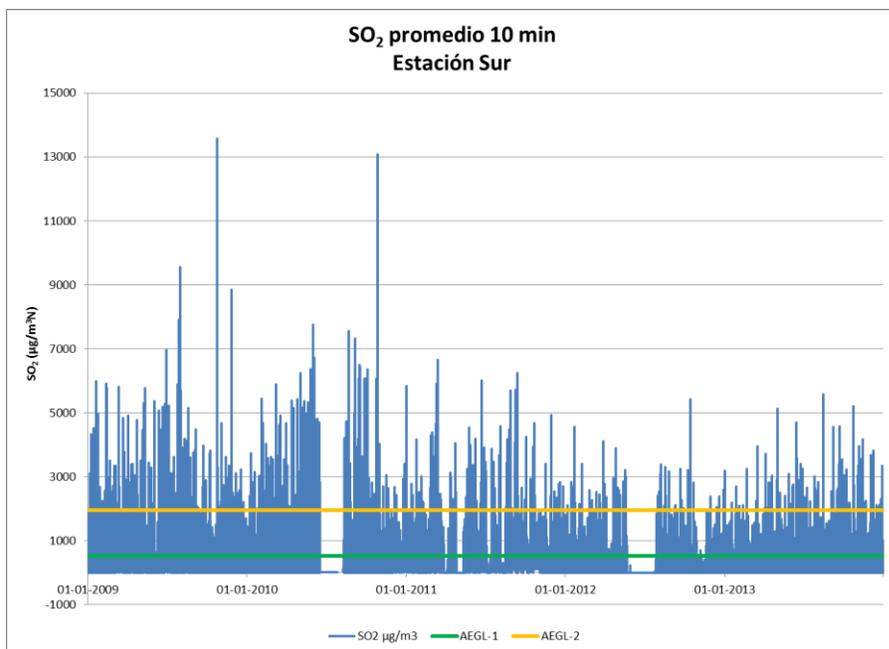
**Figura 204. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Sub Estación Eléctrica**

**Tabla 66: Análisis de Exposición Aguda Zona 3: Mejillones (Estación Sub Estación Eléctrica)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2011	8588	1 hora	0	0	0
2012	8711	1 hora	1	0	0
2013	8692	1 hora	0	0	0

### Localidad 4: Antofagasta (Estación Sur)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 11328 veces el AEGL-1 y 2094 veces el AEGL-2 entre los años 2009 y 2013 (Figura 205 y Tabla 67).



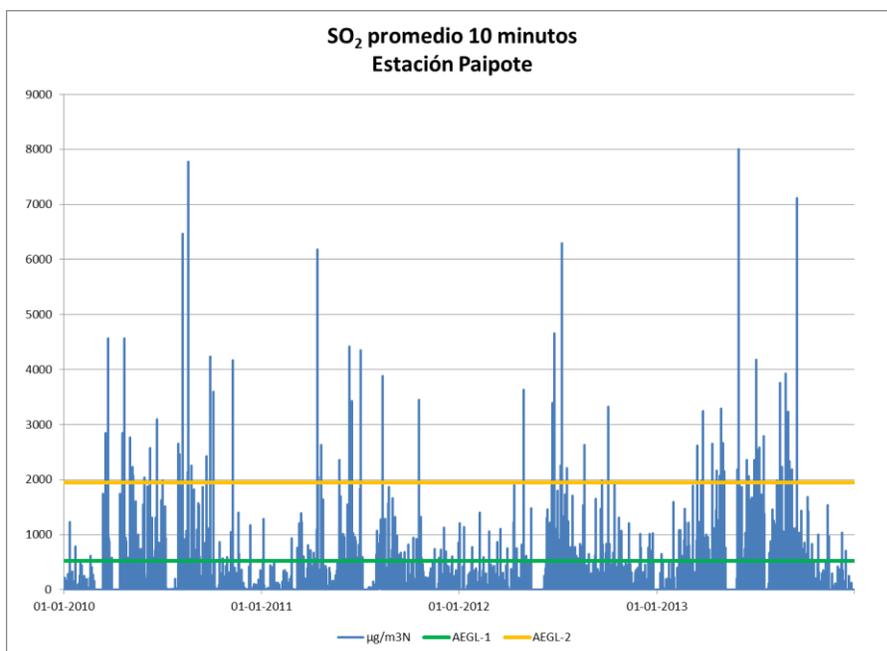
**Figura 205. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Sur**

**Tabla 67: Análisis de Exposición Aguda Zona 4: Antofagasta (Estación Sur)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2009	52545	10 min	3568	585	0
2010	50580	10 min	3750	1031	0
2011	52560	10 min	2822	352	0
2012	52698	10 min	1188	126	0
2013	52545	10 min	2199	225	0

### Localidad 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Paipote)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 2910 veces el AEGL-1 y 210 veces el AEGL-2 entre los años 2010 y 2013 (Figura 206 y Tabla 68).



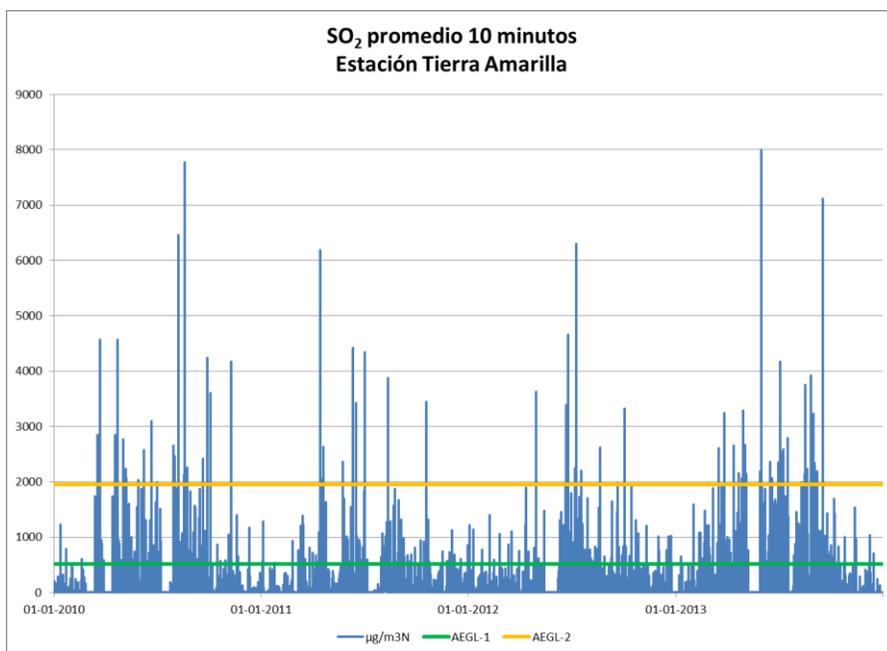
**Figura 206. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Paipote**

**Tabla 68: Análisis de Exposición Aguda Zona 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Paipote)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2010	52052	10 min	562	57	0
2011	52112	10 min	463	32	0
2012	51974	10 min	533	32	0
2013	52243	10 min	1355	89	0

**Localidad 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Tierra Amarilla)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 829 veces el AEGL-1 y 22 veces el AEGL-2 entre los años 2010 y 2013 (Figura 207 y Tabla 69).



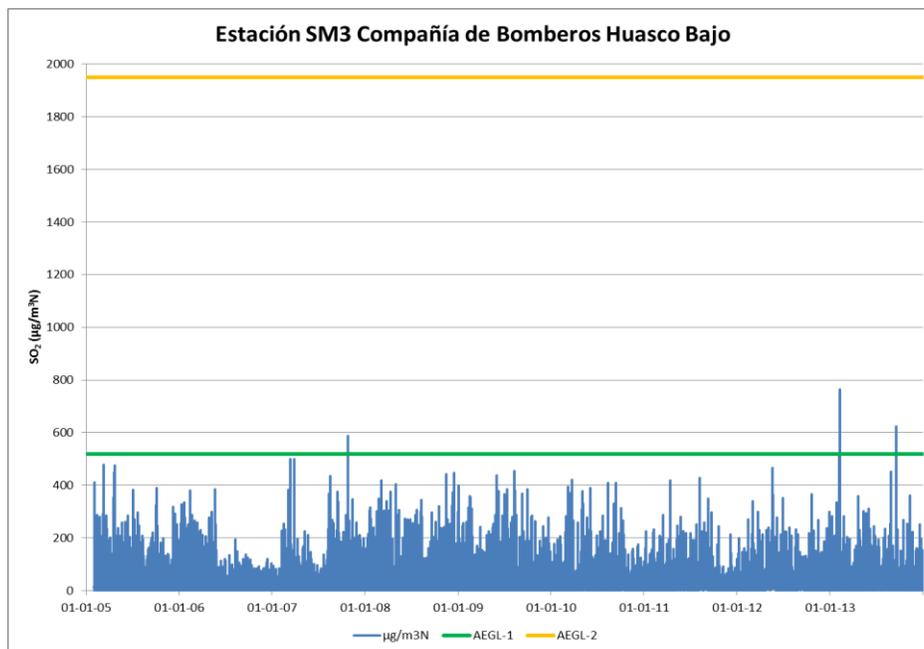
**Figura 207. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Tierra Amarilla**

**Tabla 69: Análisis de Exposición Aguda Zona 5: Copiapó-Paipote-Tierra Amarilla (Estación Tierra Amarilla)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2010	8745	10 min	84	1	0
2011	52261	10 min	142	9	0
2012	52325	10 min	233	3	0
2013	48083	10 min	370	9	0

**Localidad 6: Huasco (Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub> excedieron solo 3 veces el AEGL-1 entre los años 2005 y 2013 (Figura 208 y Tabla 70).



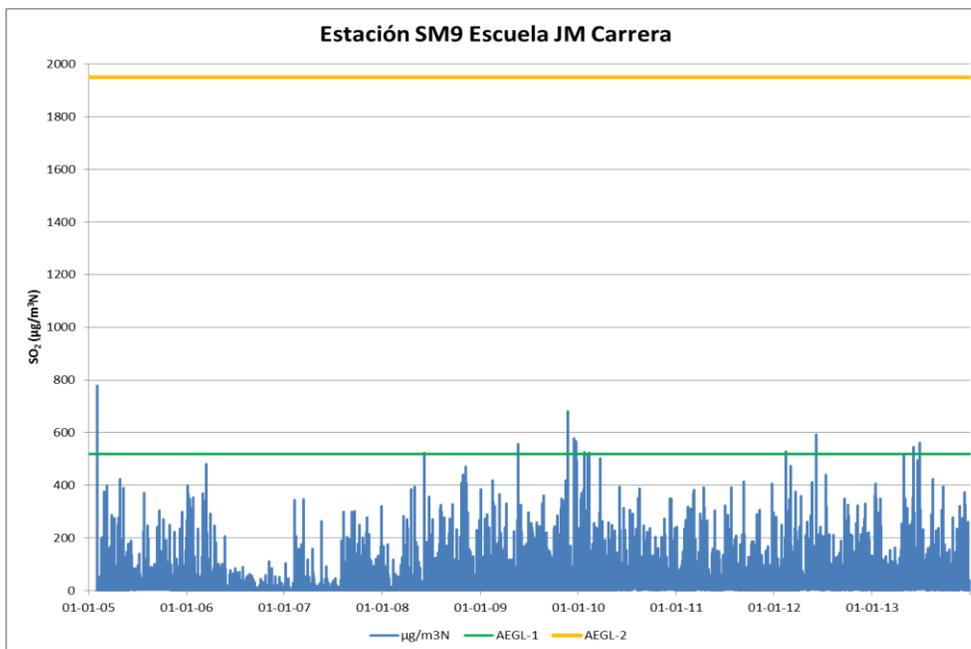
**Figura 208. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación SM3 Cia. Bomberos**

**Tabla 70: Análisis de Exposición Aguda Zona 6: Huasco (Estación SM3 Compañía de Bomberos Huasco Bajo)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2005	7984	1 hora	0	0	0
2006	8721	1 hora	0	0	0
2007	8729	1 hora	1	0	0
2008	8742	1 hora	0	0	0
2009	8610	1 hora	0	0	0
2010	8665	1 hora	0	0	0
2011	8570	1 hora	0	0	0
2012	8680	1 hora	0	0	0
2013	8605	1 hora	2	0	0

### Localidad 6: Huasco (Estación Escuela JMC)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub> excedieron 14 veces el AEGL-1 entre los años 2005 y 2013 (Figura 209 y Tabla 71).



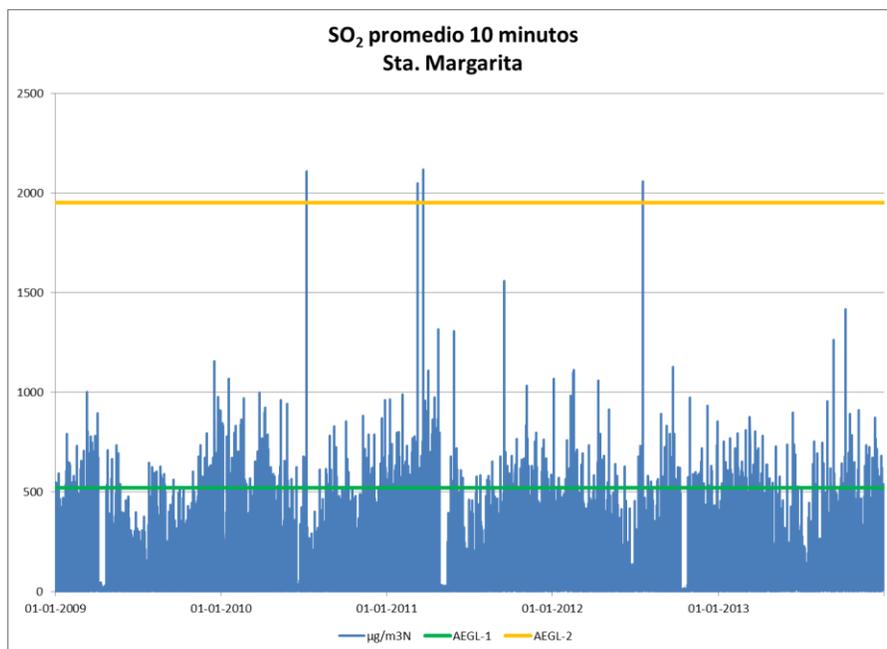
**Figura 209. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación SM9 Escuela JMC**

**Tabla 71: Análisis de Exposición Aguda Zona 6: Huasco (Estación SM9 Escuela JMC)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2005	7976	1 hora	1	0	0
2006	8712	1 hora	0	0	0
2007	8719	1 hora	0	0	0
2008	8727	1 hora	1	0	0
2009	8664	1 hora	6	0	0
2010	8650	1 hora	2	0	0
2011	8620	1 hora	0	0	0
2012	8670	1 hora	2	0	0
2013	8602	1 hora	2	0	0

**Localidad 7: Catemu-Llay Llay (Estación Santa Margarita)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 1386 veces el AEGL-1 y 7 veces el AEGL-2 entre los años 2009 y 2013 (Figura 210 y Tabla 72).



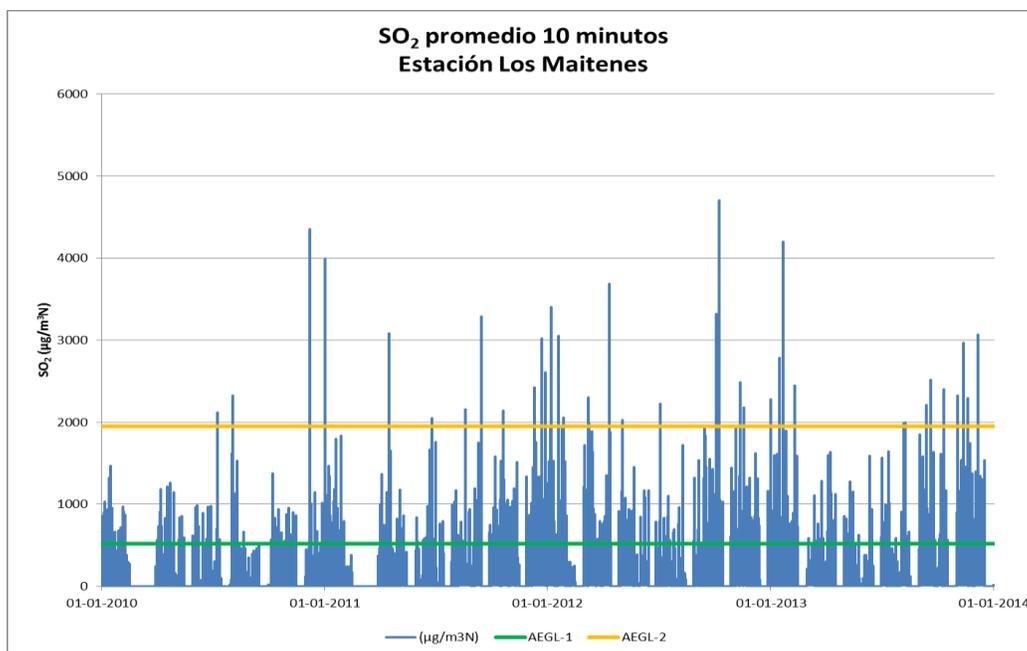
**Figura 210. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Santa Margarita**

**Tabla 72: Análisis de Exposición Aguda Zona 7: Catemu-Llay Llay (Estación Santa Margarita)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2009	50541	10 min	208	0	0
2010	49791	10 min	326	2	0
2011	50773	10 min	388	3	0
2012	51337	10 min	222	2	0
2013	51644	10 min	242	0	0

**Localidad 8: Quintero-Puchuncaví (Estación Los Maitenes)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 3159 veces el AEGL-1 y 56 veces el AEGL-2 entre los años 2005 y 2013 (Figura 211 y Tabla 73).



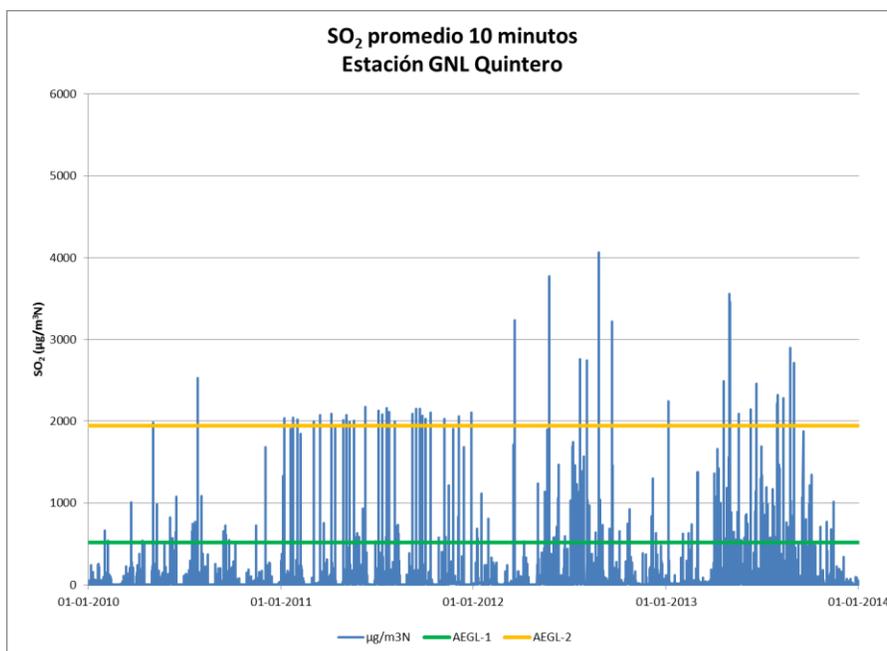
**Figura 211. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Los Maitenes**

**Tabla 73: Análisis de Exposición Aguda Zona 8: Quintero-Puchuncaví (Estación Los Maitenes)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2005	36449	10 min	284	3	0
2006	36824	10 min	570	10	0
2007	39025	10 min	756	17	0
2008	37310	10 min	857	21	0
2009	39043	10 min	692	5	0
2010	37310	10 min	346	21	0
2011	38720	10 min	279	2	0
2012	37310	10 min	156	21	0
2013	51872	10 min	266	1	0

**Localidad 8: Quinteros-Puchuncaví (Estación GNL Quintero)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 844 veces el AEGL-1 y 80 veces el AEGL-2 entre los años 2010 y 2013 (Figura 212 y Tabla 74).



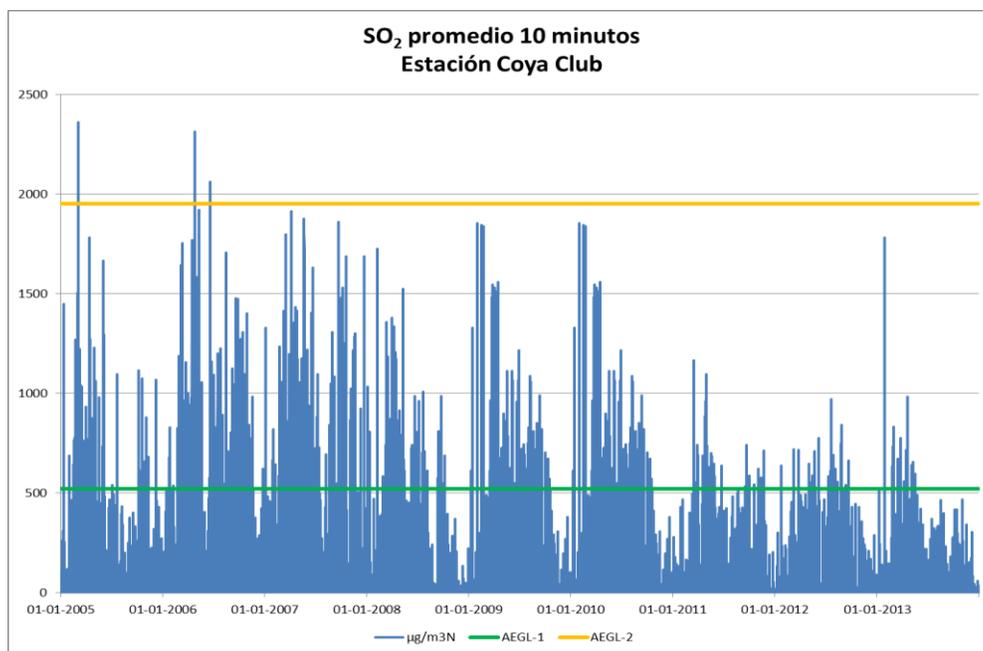
**Figura 212. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación GNL Quintero**

**Tabla 74: Análisis de Exposición Aguda Zona 8: Quintero-Puchuncaví (Estación GNL Quintero)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2010	38320	10 min	62	2	0
2011	39003	10 min	176	50	0
2012	45508	10 min	281	12	0
2013	51930	10 min	325	16	0

**Localidad 9: Coya-Machalí (Estación Coya Club)**

Para esta estación, las concentraciones promedio de 10 minutos de SO<sub>2</sub> excedieron 6882 veces el AEGL-1 y 6 veces el AEGL-2 entre los años 2005 y 2013 (Figura 213 y Tabla 75).



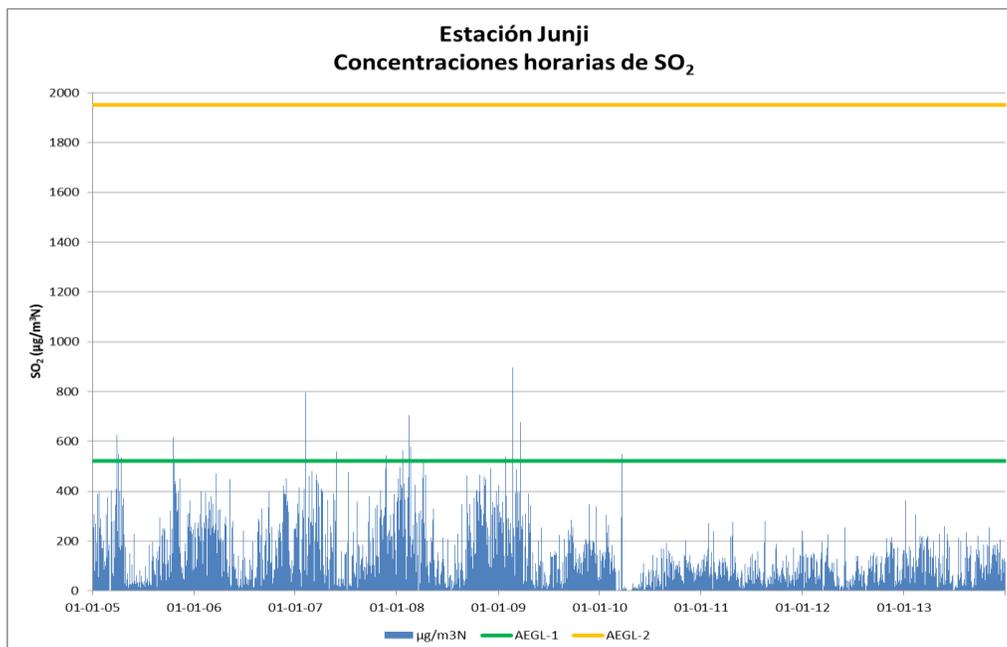
**Figura 213. Mediciones de SO<sub>2</sub> (10 min) en la Estación Coya**

**Tabla 75: Análisis de Exposición Aguda Zona 9: Coya-Machalí (Estación Coya Club)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2005	52258	10 min	652	2	0
2006	52079	10 min	1480	4	0
2007	52286	10 min	1418	0	0
2008	52138	10 min	641	0	0
2009	51116	10 min	1052	0	0
2010	51116	10 min	1052	0	0
2011	52173	10 min	310	0	0
2012	52146	10 min	175	0	0
2013	51126	10 min	102	0	0

### Localidad 10: Coronel-Lota-Huelpén (Junji)

Para esta estación, las concentraciones promedio de 1 hora de SO<sub>2</sub> excedieron 22 veces el AEGL-1 entre los años 2005 y 2013 (Figura 214 y Tabla 76).



**Figura 214. Mediciones de SO<sub>2</sub> (horas) en la Estación Junji**

**Tabla 76: Análisis de Exposición Aguda Zona 10: Coronel-Lota-Huelpén (Junji)**

Año de Monitoreo	N° Mediciones	Frecuencia temporal	Superación del Nivel de Referencia		
			AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
2005	6506	1 hora	6	0	0
2006	6689	1 hora	0	0	0
2007	7012	1 hora	6	0	0
2008	8177	1 hora	5	0	0
2009	8537	1 hora	4	0	0
2010	7745	1 hora	1	0	0
2011	8626	1 hora	0	0	0
2012	8290	1 hora	0	0	0
2013	8332	1 hora	0	0	0

### 5.3.10. Caracterización de los riesgos en salud

De acuerdo a lo descrito en secciones anteriores, el procedimiento para la caracterización del riesgo de una exposición al SO<sub>2</sub>, el nivel más bajo que está libre de efectos negativos en la salud es el AEGL-1 de 520 µg/m<sup>3</sup>.

El AEGL-1 está basado en el peso de evidencia de datos de humanos asmáticos que sugiere que 520 µg/m<sup>3</sup> puede ser el NOEL para broncoconstricción en asmáticos en ejercicio por 5 - 75 minutos, pero no tiene efectos en individuos sanos. Leves aumentos en la concentración del SO<sub>2</sub> lleva a un aumento en la resistencia de las vías aéreas SRaw, con la mayor parte del aumento de broncoconstricción ocurriendo dentro de 10 minutos.

Considerando solo el último año de monitoreo se aprecia que en 11 de los 13 escenarios se excedió el AEGL-1 de 520 µg/m<sup>3</sup> (Tabla 77),

La exposición a niveles AEGL-2 basados en un peso de evidencia en humanos asmáticos sugiere que 1950 µg/m<sup>3</sup> induce una respuesta moderada en asmáticos en ejercicio para exposiciones entre 10 min a 3 horas.

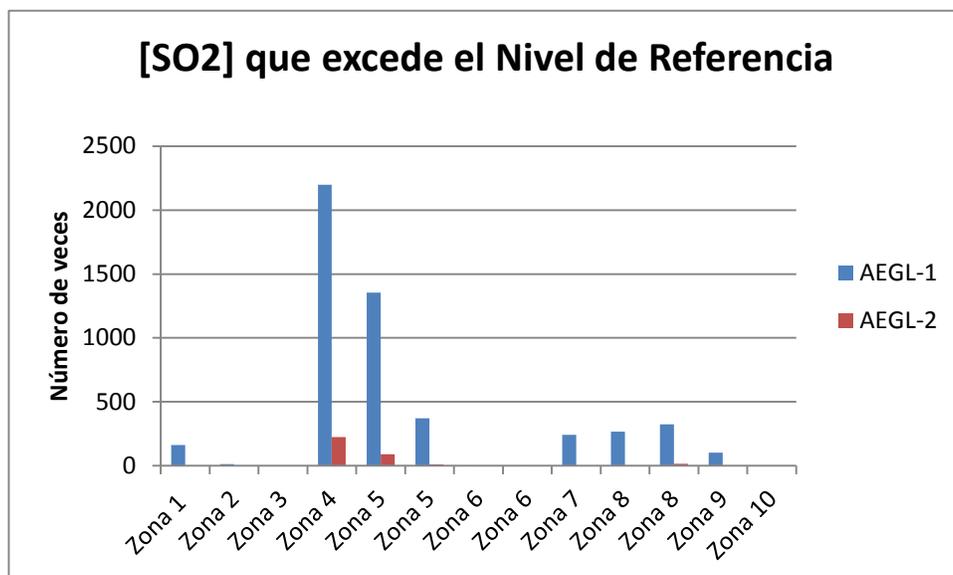
Considerando solo el último año de monitoreo se aprecia que en 5 de los 13 escenarios se excedió el AEGL-2 de 1950 µg/m<sup>3</sup> (Tabla 77), considerado discapacitante para la población general, incluyendo receptores susceptibles tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades.

De acuerdo a lo anterior se puede apreciar que los receptores de las zonas de estudio, se encuentran expuestos en ocasiones a altas concentraciones, de corta duración (exposición aguda) de SO<sub>2</sub>, que puede afectar su salud con el incremento de enfermedades respiratorias.

No se registró excedencia del AEGL-3 en ningún caso.

**Tabla 77: [SO<sub>2</sub>] que excede el Nivel de Referencia**

Zonas Año 2013	[SO <sub>2</sub> ] que excede el Nivel de Referencia		
	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3
Zona 1	162	0	0
Zona 2	12	0	0
Zona 3	0	0	0
Zona 4	2199	225	0
Zona 5	1355	89	0
Zona 5	370	9	0
Zona 6	2	0	0
Zona 6	2	0	0
Zona 7	242	0	0
Zona 8	266	1	0
Zona 8	325	16	0
Zona 9	102	0	0
Zona 10	0	0	0



**Figura 215. [SO<sub>2</sub>] que Excede el Nivel de Referencia**

Cabe señalar que la información más directa de los efectos de corto plazo del SO<sub>2</sub> proviene de estudios en cámara controlada usando voluntarios. La mayoría de estos estudios han sido por períodos de exposición entre pocos minutos y hasta 1 hora.

Las concentraciones aéreas de SO<sub>2</sub> de 5-10 minutos son de preocupación solamente para localidades específicas, típicamente ubicadas cerca de las fuentes. Lugares donde ocurren peaks de SO<sub>2</sub> de corta duración requieren estándares de 5-10 minutos. Esto trae la pregunta si se puede monitorear con precisión de SO<sub>2</sub> nivel.

Los peaks de 10 min de SO<sub>2</sub> son de la más alta preocupación en áreas cercanas a las fuentes de origen.

### 5.3.11. Evaluación y análisis de la incertidumbre

En el análisis de la incertidumbre, se pregunta:

- ¿Cuáles son las fuentes de incertidumbre que pueden influir en la calidad de las conclusiones y resultados?
- ¿Cómo afecta la variabilidad de los factores de exposición a los resultados de riesgo final?

Inevitablemente, existe una considerable incertidumbre inherente en determinados aspectos de la toxicología y análisis de riesgos en la salud. Estas comienzan con el uso de suposiciones e inferencias necesarias para llevar a cabo la estimación de riesgo.

Hay numerosas metodologías para describir cualitativamente y *cuantificar* la incertidumbre en un análisis de riesgos en la salud asociados con sustancias químicas. Estas incluyen métodos analíticos para modelos simples y enfoques numéricos que requieren uso de computadoras para modelos más complejos. Así, se dispone de análisis por árboles de decisión o lógicos, análisis de sistemas, y métodos de simulación por propagación de error.

#### Bases conceptuales del problema

##### Variabilidad, estocasticidad, o incertidumbre tipo A

La variabilidad se debe a la verdadera *heterogeneidad natural* de los factores de exposición humana. Por ejemplo, ingesta diaria, peso corporal, tasa de respiración, actividad física o en el trabajo. La estocasticidad no puede reducirse a través de más mediciones, pero puede ser descrita y estimada. Una evaluación del riesgo que incorpora la incertidumbre debido a la variabilidad natural de factores de exposición humana se conoce como una evaluación de riesgos de salud estocástico (SHRA) y ocasionalmente se lo denomina probabilística. La heterogeneidad puede causar una reducción de la precisión de las estimaciones, cambiar la forma de un modelo de exposición, o reducir la generalización de los resultados de un estudio. La variabilidad es un fenómeno físico, químico y biológico.

##### Verdadera incertidumbre o incertidumbre tipo B

Esta es atribuible a la ignorancia o falta de conocimiento sobre un elemento crítico mal caracterizado en la evaluación del riesgo. Ejemplos incluyen juicio profesional o sesgo, incertidumbre asociada a la toxicidad de los productos químicos tales como efectos aditivos, sinérgicos o antagónicos; pendiente de potencia; extrapolación interespecies dosis. La verdadera incertidumbre puede reducirse a través de más conocimiento y mediciones, pero no puede ser descrito o estimado. Error humano, una parte inevitable de todas las actividades humanas, es un ejemplo de incertidumbre. Errores

sistemáticos en las mediciones y muestreo, errores de registro de datos o errores computacionales, pueden minimizarse mediante la imposición de un programa de control de calidad y aseguramiento de la calidad terminante. La incertidumbre es un fenómeno intelectual.

En el análisis de riesgo por exposición al SO<sub>2</sub> se pueden identificar las siguientes fuentes de incertidumbre.

### **Incertidumbre en la información de toxicidad y efectos en la salud**

Estas fuentes son *independientes de la evidencia específica* del problema de contaminación, y están asociadas con la información de toxicidad y efectos en la salud. Ejemplos:

- Debida a diferencias entre individuos (susceptibilidad) asociados intrínsecamente con los criterios de toxicidad. Por ejemplo, en las dosis de referencia, la incertidumbre depende de los factores de incertidumbre aplicados en la derivación de las dosis de referencia.
- Uso de criterios de toxicidad sustitutos tomados de compuestos análogos.

### **Incertidumbre en la evidencia de las variables**

Estas se refieren a las fuentes de incertidumbre en las mediciones o cálculo de la concentración. Esta incertidumbre está relacionada con la *evidencia específica* del problema de contaminación e independiente de la toxicidad y efectos biológicos. Ejemplos:

- Cuando las mediciones de las concentraciones del SO<sub>2</sub> ambiental son sustitutos de exposición personal al SO<sub>2</sub> ambiental.
- Cuando los niveles de detección analítica están por encima de los niveles ambientales que están libres de efectos biológicos considerados negativos. Similarmente, cuando los límites de detección metodológicos son demasiado altos para contaminantes críticos.
- El número de muestras. Un número limitado de muestras está asociada a una baja exactitud y precisión del valor representativo de concentración, y por lo tanto una mayor incertidumbre en la validez de los resultados de análisis.
- Es probable que compuestos adicionales formen parte de las mezclas aéreas.
- El error instrumental y en la medición.
- Incertidumbre en estudios epidemiológicos que están asociados con variación espacial y variación de SO<sub>2</sub> a través de las comunidades.

## **Fuentes de incertidumbre en la estimación de exposición al contaminante**

Esta se refiere a la incertidumbre en la estimación del ingreso de contaminantes al organismo. Ejemplos:

- En la estimación de la concentración del contaminante, tal como la concentración medida en el medio ambiente y la exposición promedio de la comunidad.
- Un límite de detección que no está suficientemente por debajo de una dosis de referencia, puede contribuir al riesgo en la salud aun cuando el análisis no haya revelado concentración o presencia positiva.

## **Incertidumbre en los modelos de migración ambiental, exposición y riesgo**

- El modelo USEPA PNAAQs presenta un alto nivel de complejidad y desde este punto de vista, de incertidumbre.

## **Conclusiones del análisis de incertidumbre**

En el presente análisis de riesgo se debe suponer que hay aspectos que están afectados por incertidumbre. Errores, supuestos, y modelos pueden resultar en *sobre-estimación o sub-estimación* de concentraciones de contaminantes, niveles de exposición, y por ende, de riesgo en la salud. Una subestimación inadvertida sin embargo es la más seria. Practicantes de análisis de riesgo, como también agencias de gobierno tales como la USEPA han establecido principios y prácticas para controlar una incertidumbre adicional en el proceso.

El documento explica los antecedentes teóricos de índole cualitativos. Un análisis cuantitativo debe ser específico y no genérico, y consume recursos de tiempo, personal, y computación. Un análisis Monte-Carlo sólo puede llevarse a cabo con una hipótesis definida. El análisis puede llevarse a cabo con una entrada o doble entrada, lo que lo hace mucho más complejo no sólo para el profesional que lleva a cabo el análisis estadístico, sino que es mucho más difícil para ser explicado.

En el presente estudio se puso especial énfasis en el control de la incertidumbre en los datos de calidad de aire. Así, la información con datos crudos fue recibida, verificada, y revisada por errores. Este trabajo, que significó un trabajo extraordinario, permite asegurar que la evidencia de calidad de aire es sólida y confiable.

En conclusión, la incertidumbre identificada en el presente estudio es considerada típica para problemas ambientales.

### 5.3.12. Conclusiones de la evaluación de riesgo

En base a los resultados obtenidos se concluye:

Es fundamental disponer de las concentraciones del contaminante en el aire en acotadas medidas temporales debido a las características toxicológicas del SO<sub>2</sub> (efectos agudos) y no aplica determinar una única concentración promedio representativa como en el caso de efectos crónicos.

No se identificó un procedimiento para el cálculo de la dosis de exposición aguda de SO<sub>2</sub> por inhalación, por lo cual se llevó a cabo por comparación directa de la concentración aérea de SO<sub>2</sub>, utilizando los Niveles Guía de Exposición Aguda (AEGLs), como valores de referencia para evaluar las emisiones aéreas de corto plazo.

La influencia de niveles intermedios de dióxido de azufre (en el orden de 520 µg/m<sup>3</sup> en niveles próximos al valor AEGL-1 descrito como la concentración que provoca molestia en la población y efectos pasajeros; o sea, perceptibles) fueron detectados en el 58% de los escenarios estudiados durante el último año.

Los niveles detectados excedieron el valor de AEGL-2 de 0,75 ppm = 1,95 mg/m<sup>3</sup> en 5 escenarios analizados durante el año 2013 considerado discapacitante para la población general, incluyendo receptores susceptibles tales como niños de corta edad, los ancianos, personas con asma, y personas con enfermedades.

No fueron detectados eventos de superación del AEGL-3.

## 5.4. Evaluación económica y social

### 5.4.1. Introducción: Fundamentos conceptuales del análisis

La evaluación económica y social de normas ambientales busca comprender las implicancias de una regulación desde una perspectiva que considera los cambios que se producirían sobre dichos ámbitos de la actividad humana. Para llevar adelante esta evaluación, se puede utilizar, básicamente, dos enfoques.

El primero consiste, a grandes trazos, en monetizar (llevar a valores monetarios) todos los costos y beneficios identificables<sup>57</sup> (ambientales y no ambientales) por las personas para compararlos entre ellos (formalmente) y ver si la suma de estos valores genera un beneficio neto (beneficio mayor que costo) o un costo neto (costo mayor que beneficio), siempre considerando en un plazo definido y descontando (valor presente) los valores para poder compararlos como si ocurrieran en un mismo momento<sup>58</sup>.

En este enfoque (análisis de costos y beneficios) se busca cuantificar la mayor cantidad posible de impactos y analizar cualitativamente aquellos que (ya sea por ausencia de datos o por complejidad del cálculo) no sea posible de cuantificar (o monetizar). Los costos o beneficios analizados cualitativamente se utilizan para reforzar o matizar los resultados obtenidos en el ejercicio cuantitativo.

Los resultados pueden ser sensibilizados para diferentes supuestos de manera de recoger los posibles escenarios posibles (rangos de impacto o de valor). Es, esencialmente, un enfoque que se concentra en la “eficiencia” agregada de una acción o de un estándar. Entrega resultados definitivos para comparación; es decir, bajo un conjunto homogéneo de supuestos establece un ordenamiento claro de las opciones “mejores” o “peores”.

En este enfoque, los aspectos distributivos pueden ser considerados directamente (ponderando de manera diferente los impactos de costos y beneficios de distintos agentes) o considerarse en términos más cualitativos una vez obtenidos los resultados cuantitativos.

El segundo enfoque (análisis socioeconómico) consiste, en lo medular, en identificar los cambios que una determinada acción institucional provoca sobre el bienestar en los ámbitos socioeconómicos sustantivos; es decir sobre las condiciones de vida: la

---

<sup>57</sup> Un costo (o un beneficio) puede ser directamente material o se un perjuicio (o beneficio) percibido por alguna persona. Es una medición estrictamente antropocéntrica e individual (es decir, considera el beneficio o perjuicio percibido por cada individuo. En este enfoque los costos y beneficios individuales son sumados para obtener el costo y beneficio social.

<sup>58</sup> Debe notarse, adicionalmente, que el grado de monetización de costos y beneficios depende también de consideraciones sobre la pertinencia conceptual y ética de valorar ciertos tipos de impactos que nos directamente materiales

realidad de cada uno de estos sistemas humanos<sup>59</sup>. Los cambios que afectan a la economía se entienden, en este marco, como aquellos que pueden resultar (en plazos que no tienen que estar estrictamente definidos) sobre la producción, intercambio y consumo de bienes y servicios relacionados con el bienestar material. Los cambios que afectan a la sociedad se refieren a aquellos que determinan las condiciones de la vida social institucional (organizaciones) y la calidad de vida individual (las relaciones sociales, los aspectos patrimoniales, y las percepciones sobre las condiciones subjetivas).

En este segundo enfoque, el análisis también toma en cuenta elementos cuantitativos y cualitativos, pero no busca reducir todo a costos y beneficios individuales agregados y comparables, si no que identifica impactos (es decir cambios relevantes) generados por efecto de una acción sobre ámbitos específicos (un sector económico por ejemplo), grupos de personas (organizaciones formales o informales o agentes interesados en general) o sobre las relaciones entre ellos (aspectos distributivos o de desigualdad). En el análisis cuantitativo es posible utilizar variados tipos de mediciones (no necesariamente todas monetizadas, ni siquiera en el análisis del ámbito económico) que pueden o no relacionarse con la eficiencia de la medida, y se puede buscar (o no) resumir todos los análisis en un indicador o usar un conjunto de mediciones diverso<sup>60</sup>. Como se observa, este enfoque es más abierto que el primero (cubre un espectro de temas más amplio y con metodologías y criterios más variados) y se concentra tanto en identificar el proceso de cambios como los cambios mismos.

Es importante notar que ambos enfoques permiten ver tanto la conveniencia de normar como la conveniencia relativa de una u otra opción normativa. Sin embargo, el primer enfoque está más estrictamente orientado a definir con “precisión” cuál es la “mejor” normativa pues establece un criterio definitivo. El segundo enfoque, si bien entrega antecedentes relevantes para la decisión, finalmente mantiene la decisión en el ámbito político.

La utilización de uno u otro de estos enfoques depende de consideraciones de muy diversa índole.

Una de las consideraciones es de orden metodológico y tiene que ver con la lógica conceptual y la pertinencia de cuantificar y monetizar todos los tipos de costos y beneficios, materiales y no materiales, bajo un marco utilitarista. Otra consideración metodológica tiene que ver con la necesidad o no de disponer de un “valor” resumen que identifique claramente si la acción bajo análisis (en este caso, una norma ambiental) debe o no debe ser tomada. Desde una perspectiva más ética, se discute a veces la pertinencia de usar métodos que tienden a favorecer a grupos grandes (porque se consideran de manera aditiva) o de mayor disposición a pagar (porque la valorización de sus costos o beneficios será mayor dada). Por otra parte, algunos

---

<sup>59</sup> Existen fuertes interrelaciones entre los sistemas económicos y sociales por lo que a menudo es difícil separarlos con claridad.

<sup>60</sup> Metodologías como el análisis multicriterio se utilizan a menudo en este enfoque cuando se busca tener un número reducido de indicadores para orientar la toma de decisiones.

cuestionan metodológicamente el que no se use mediciones homogéneas para todos los tipos de impactos considerados.

Adicionalmente a los temas metodológicos y éticos, una consideración importante para la aplicación de uno u otro de los enfoques es la disponibilidad y la calidad de los datos existentes, tanto en términos de las mediciones de impacto físico (sobre los seres humanos directamente o sobre los bienes) como de las mediciones de valor que permiten monetizar. Existen por lo demás técnicas específicas para obtener valores monetarios para ciertos impactos no monetarios que a menudo son de alta complejidad y también altamente exigente en recursos.

Ambos enfoques no son contradictorios, sino que pueden ser complementarios, aunque normalmente se utiliza sólo alguno de ellos en función de alguna de las consideraciones planteadas previamente.

En este informe, se ha optado por la utilización de ambos enfoques, ajustados a la disponibilidad de información y a las posibilidades reales en el contexto del estudio. Finalmente, se presentará una síntesis de los aportes de cada enfoque y algunos criterios de pertinencia para cada uno en este caso.

Una razón fundamental para no concentrarse en una sola perspectiva, es que la medida bajo análisis es más bien un marco habilitante para un conjunto de acciones con resultados posteriores que una acción en sí misma. Por lo tanto, se requiere una mirada más amplia a sus posibles consecuencias.

Adicionalmente, el hecho de contar con relativamente pocos datos para identificar con precisión costos y beneficios monetizados, que es el enfoque más usual para el análisis de impactos sociales y económicos, sugiere la necesidad de incorporar la segunda perspectiva para obtener mejores criterios para la decisión. Asimismo, cabe destacar que la evaluación de costos y beneficios fue diseñada con el propósito de evaluar proyectos, por lo que no toma en cuenta el rol de la norma dentro de la institucionalidad (habilitante para un conjunto de medidas que protegen a la población).

Finalmente, se debe notar que la norma es de nivel nacional, pero que los efectos actuales se despliegan en territorios específicos, por lo que el enfoque de análisis socioeconómico puede incorporar posibles impactos futuros en otras zonas (aun completamente inciertos), de manera más coherente con el resto del análisis.

En consecuencia, usar ambos enfoques permite mostrar una visión más completa de las implicancias económicas y sociales de esta norma.

Se parte en la sección siguiente, con una revisión de los antecedentes cuantitativos disponibles, y se continúa con el análisis de costos y beneficios tomando en cuenta todas las restricciones existentes para su desarrollo. La sección posterior desarrolla algunos elementos centrales de un análisis socioeconómico y finalmente las conclusiones buscan integrar los resultados principales de ambos enfoques para aportar a la toma de decisiones.

### 5.4.2. Antecedentes generales

Es importante tener presente que la norma de concentración se suma a otros instrumentos regulatorios orientados a reducir la contaminación por SO<sub>2</sub>. Estos instrumentos regulatorios son los siguientes:

**Tabla 78. Instrumentos Regulatorios vigentes para el SO<sub>2</sub>.**

Instrumento regulatorio	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Termoeléctricas Reducción de SO <sub>2</sub> (23 de junio 2016)											
Fundiciones Reducción de SO <sub>2</sub> (12 de diciembre 2018)											
País Combustibles transporte S < 15 ppm											
RM Combustibles transporte S < 15 ppm											
País Combustibles industria diésel S < 50 ppm											
RM Combustibles industria diésel S < 50 ppm											
RM: Combustibles industria FUEL 5 - 6 1% de S											
País: Combustible industria FUEL 5 - 6 : de 5% paso a 3% de S											

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente

A esto se le debe sumar que la implementación efectiva de la norma se hace por medio de instrumentos específicos: (aún inexistentes) La existencia de varios instrumentos regulatorios que inciden sobre las concentraciones de SO<sub>2</sub>, exigen considerar como se hará la asignación de costos y beneficios en los casos pertinentes. Esta asignación deberá tomar en cuenta que la norma de SO<sub>2</sub> es el marco habilitante para la implementación de acciones específicas (como los planes de prevención y descontaminación).

Adicionalmente, la norma se está analizando en tres configuraciones posibles, cada una de las cuales tendrá diferentes implicancias económicas y sociales.

**Tabla 79. Escenarios de normativa para el SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>N).**

	1 hora	24 horas	Anual
<b>E1</b>	197	--	--
<b>E2</b>	350	125	60
<b>E3</b>	500	150	80

<i>Base</i>	--	250	80
-------------	----	-----	----

Cada una de estas configuraciones debería ser considerada, pero como se verá, no existe información precisa para hacerlo en detalle, por lo que se analizarán a partir de criterios generales.

Finalmente, debe considerarse que si bien la norma es de alcance nacional, los impactos medibles actualmente están acotados a ciertas áreas que tienen altas concentraciones de SO<sub>2</sub> (Tocopilla, Calama, Mejillones, Antofagasta, Copiapó, Paipote y Tierra Amarilla, Huasco, Catemu, Llay Llay, Quintero, Puchuncaví, Machalí, Coya, Coronel, Lota y Hualpén). En el largo plazo, hay más lugares posiblemente influenciados por la norma, pero en ausencia de información de proyectos específicos es imposible precisar cuáles serían, lo cual también tendrá implicancias para el análisis del problema. A continuación se resume información de estas localidades en términos de SO<sub>2</sub>.

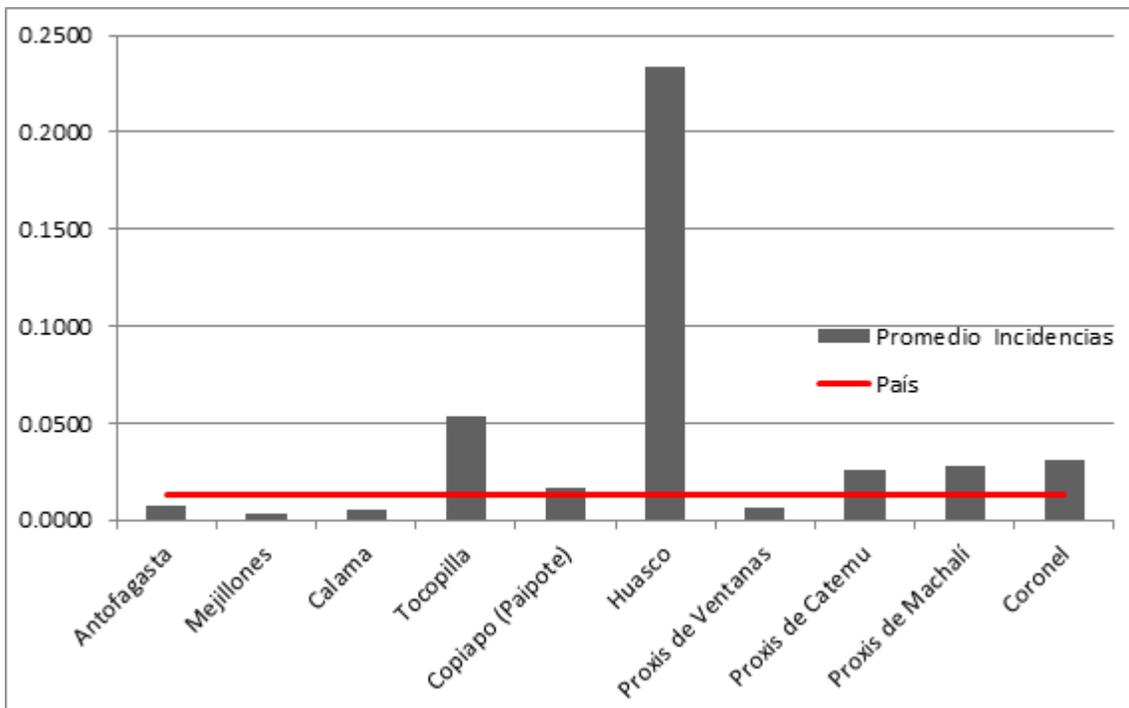
### Urgencias respiratorias

La gran mayoría de las localidades evaluadas sobrepasan todos los escenarios regulatorios con diferentes frecuencias. A continuación se mostrará evidencia del impacto de altos niveles de SO<sub>2</sub> en ciertas localidades sobre casos de urgencias respiratorias agudas (especialmente en Tocopilla y Huasco) en relación con sus regiones de pertenencia y con el país.

En la Figura 216<sup>61</sup> se puede observar el promedio anual de incidencias de urgencias respiratorias de crisis obstructiva bronquial, que incluye asma. De las 10 localidades bajo estudio seis están por sobre la media del país. Tres de estas localidades son proxis debido a incluyen otras comunas por lo que el efecto de consulta de urgencia por crisis obstructiva bronquial esta subestimado<sup>62</sup>. En este contexto es importante hacer notar que todas las presentes son subestimaciones de las verdaderas cifras, ya que en el análisis se incorporó la población de toda la comuna, y no solamente las localidades afectadas.

<sup>61</sup> En este gráfico y en los siguientes, se toma en algunos casos datos que son “proxis” de las localidades bajo estudio, ya que no se tiene la información específica de esas localidades.

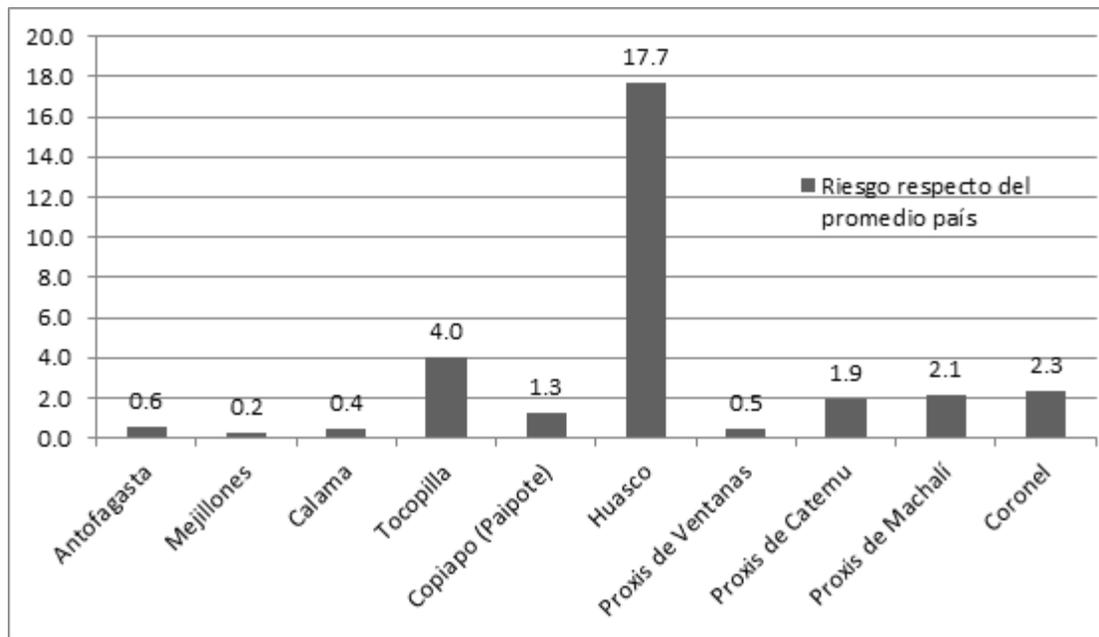
<sup>62</sup> La información proviene de diversas fuentes: Población Antofagasta, Mejillones, Calama, Tocopilla, Huasco - censo 2002; Copiapó (incluye Paipote) - censo 2002; Puchuncaví sin información, incluye Quillota - censo 2012, Quilpué - censo 2012, Villa Alemana sin información; Catemu, incluye Los Andes censo 2002, San Felipe casen 2006; Machali censo 2012, incluye Rengo censo 2002, Requinoa censo 2002, San Fernando - censo 2002; Coronel censo 2012.



**Figura 216. Promedio anual de incidencias de Urgencias Respiratorias (2010 al 2013). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

Desde una perspectiva distributiva las poblaciones de las comunas en estudio están pagando los costos de los impactos ambientales de las fundiciones y termoeléctricas que están a su alrededor, exponiendo a esta población a más alta incidencia de enfermedades respiratorias, como se visualiza en el Figura 217.

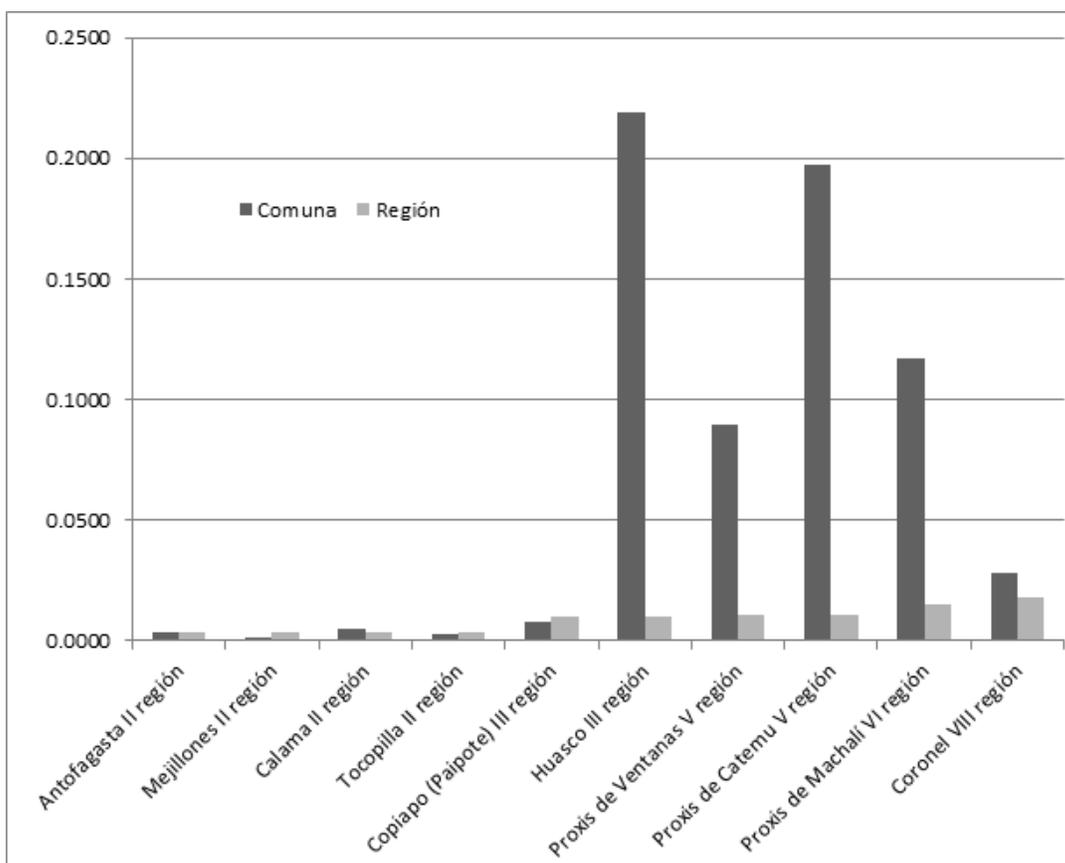
En esta figura se muestra cómo se multiplica el riesgo de cuadro respiratorio agudo (crisis obstructiva bronquial, que incluye asma) en cada comuna bajo estudio respecto del promedio en el país. En todas las comunas donde hay altas concentraciones de  $SO_2$  se sobrepasa el promedio nacional, siendo Huasco y Tocopilla claramente las comunas más afectadas con 17,7 y 4 veces el promedio nacional, respectivamente.



**Figura 217. Riesgo de cuadro respiratorio agudo respecto del promedio del país.**  
Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.

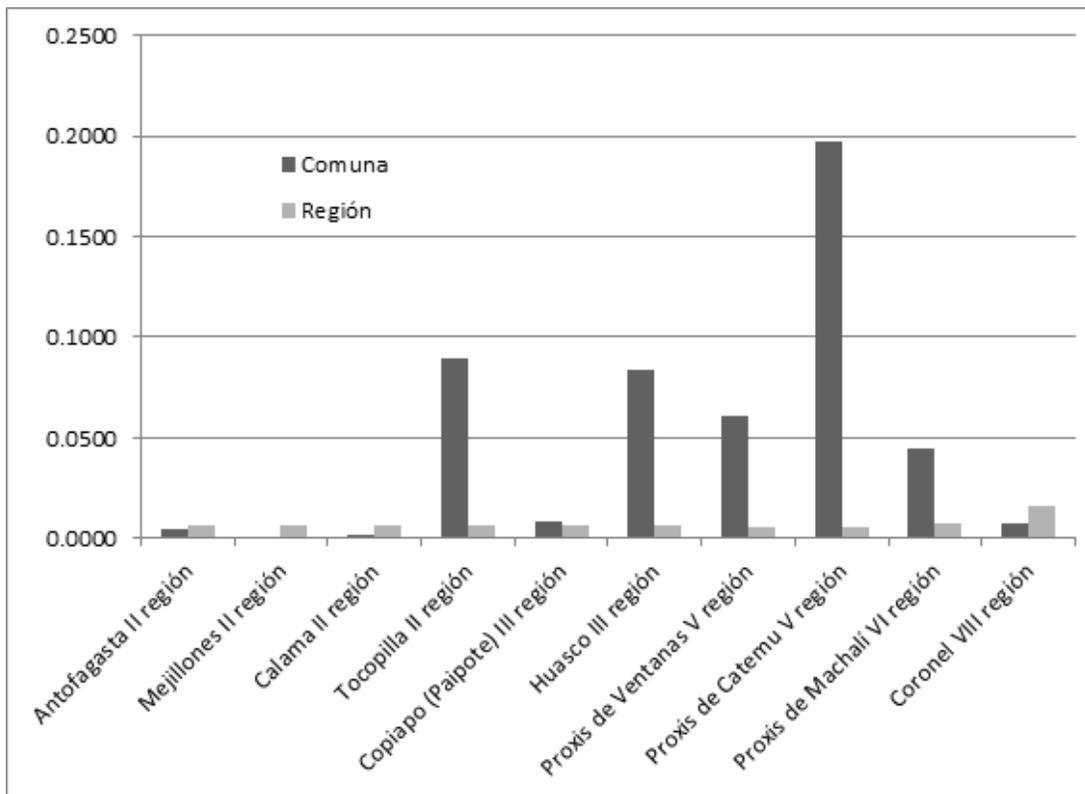
En la Figura 218 se observa que la incidencia promedio de casos de crisis obstructiva bronquial entre los niños (1-14 años) es comparativamente mayor en las regiones de Calama, Huasco, Catemu, Machali y Coronel, respecto de los valores de sus respectivas regiones.

Como es posible observar la mitad de las comunas bajo estudio tienen incidencia de urgencias respiratorias agudas por sobre la incidencia regional en los niños entre 1 y 15 años de edad.



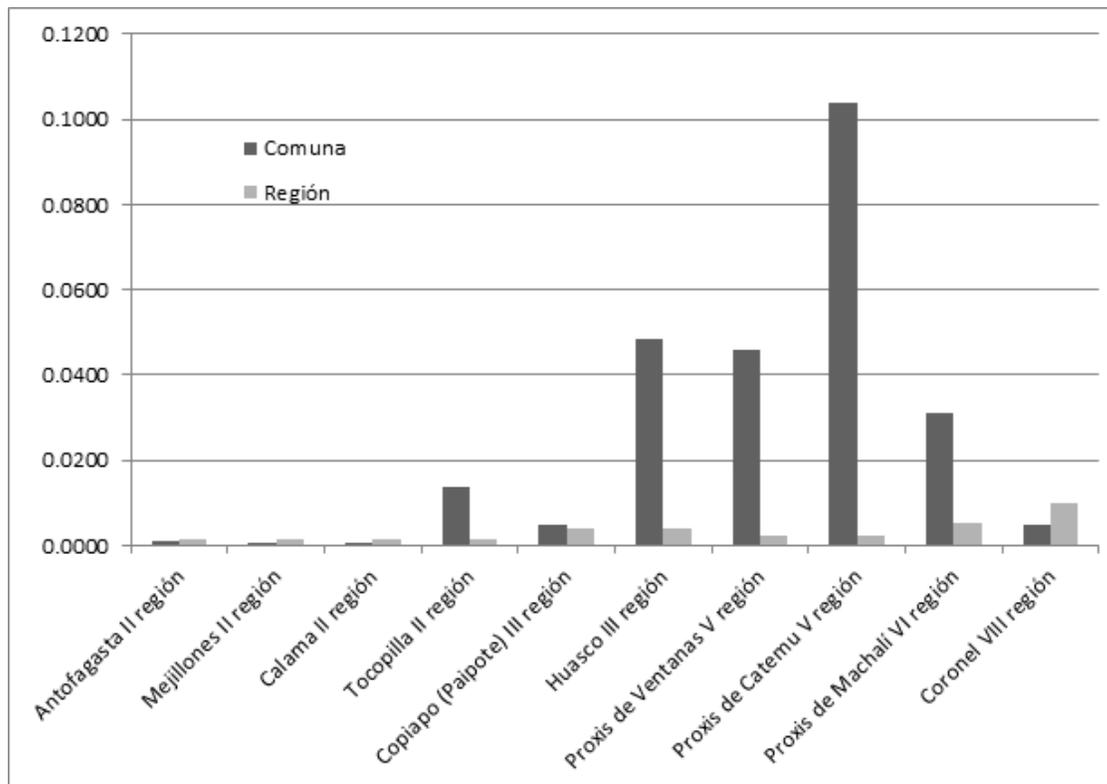
**Figura 218. Comparación de incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en niños de 1 a 14 años. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

En la Figura 219 se observa la misma variable para el grupo etario de 15 a 64 años. Nuevamente se observa la mayor incidencia en las mismas cinco comunas (Calama, Huasco, Catemu, Machali y Coronel). Se destaca como en el grupo etario de adultos trabajadores la incidencia en la comuna de Tocopilla es altísima en comparación con el grupo etario niños (Figura 218) y adultos mayores (Figura 220).



**Figura 219. Incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en adultos de 15 a 64 años. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

Algo similar se observa para la incidencia en los adultos mayores, como muestra la Figura 220.



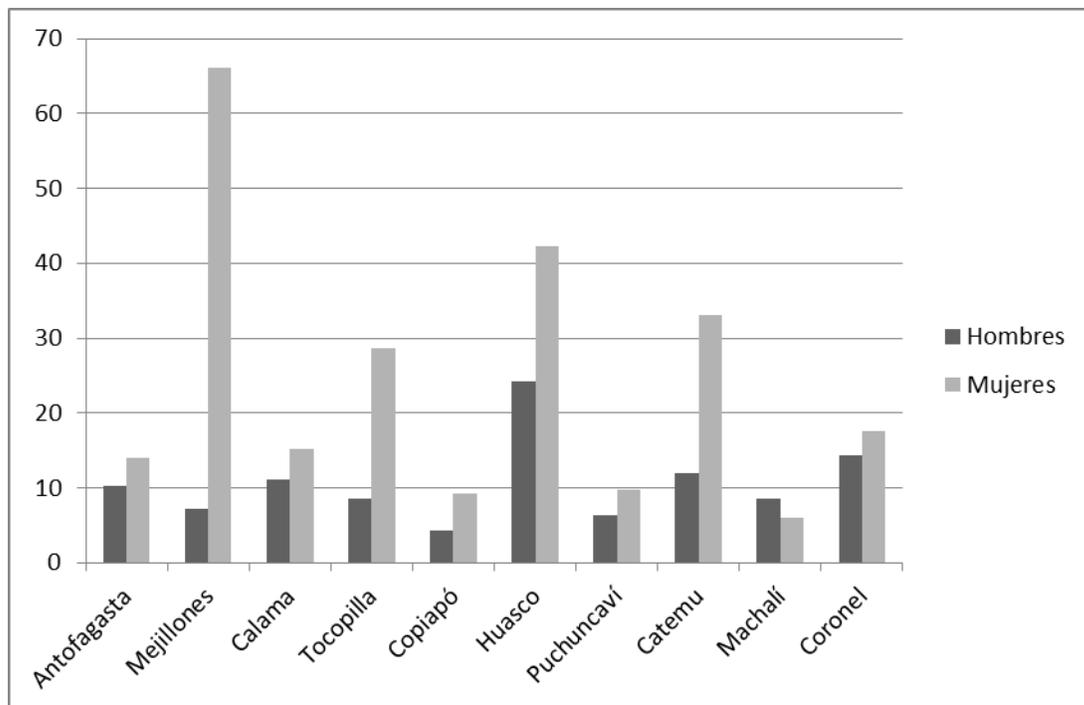
**Figura 220. Comparación de incidencia promedio de urgencias de crisis obstructiva bronquial en comuna y región en adultos mayores de 65 años o más. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

Hay una cierta coherencia en los resultados de algunas comunas (Huasco, Catemu, Machali y Coronel)) con altos niveles de casos de enfermedades respiratorias respecto del total de la población a través de todos los grupos etarios. Se puede concluir que aunque se presentan algunas diferencias etarias en incidencias de enfermedades respiratorias agudas en las comunas bajo estudio, existe una tendencia clara de que la mitad de las comunas bajo estudio presenten un porcentaje superior que la media regional de incidencias.

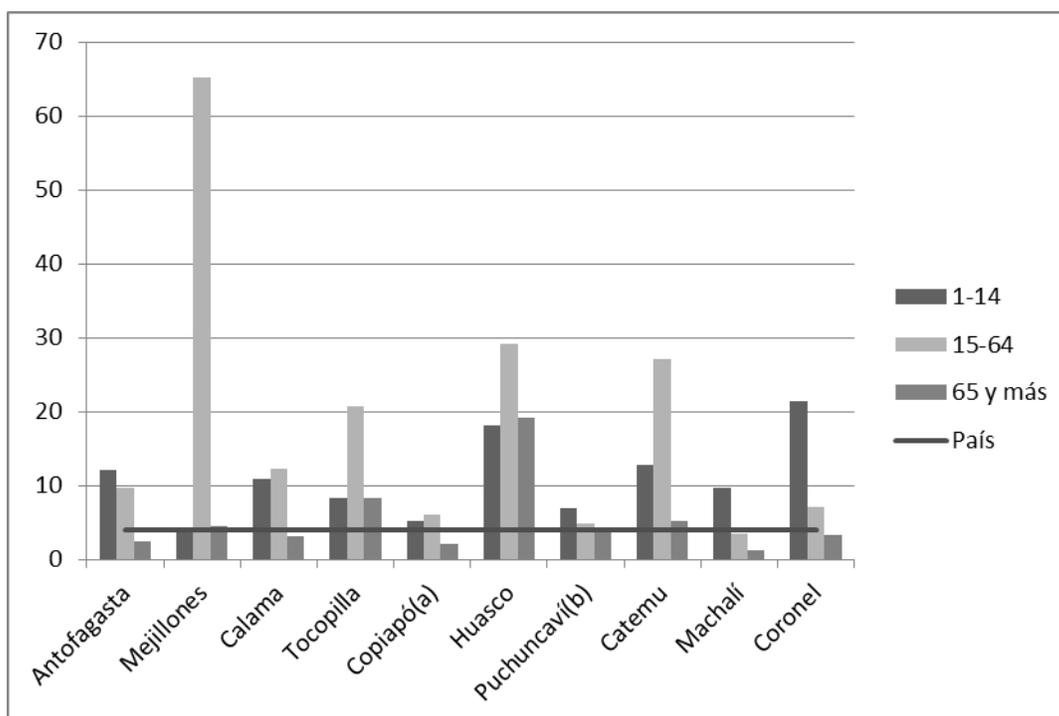
### Hospitalizaciones

En la Figura 221 se muestra la comparación para hombres y mujeres de hospitalizaciones por asma por cada 100.000 habitantes. En este gráfico se pueden apreciar dos puntos relevantes: (i) se presentan muchos más casos de mujeres que hombres en casos crónicos o graves de asma, y (ii) se puede ver el efecto de no usar proxis en Catemu, en el que se aprecian muchos más casos que integrando otras comunas para el caso de las urgencias.

Respecto del primero punto, una hipótesis es que el grupo mujeres es mayoritariamente afectado pues los hombres salen a trabajar fuera del hogar, mientras que las mujeres quedan expuestas a las plumas de SO<sub>2</sub>. Este argumento es reforzado en la Figura 221 que muestra mayor incidencia entre las mujeres que los hombres para casos graves de asma.



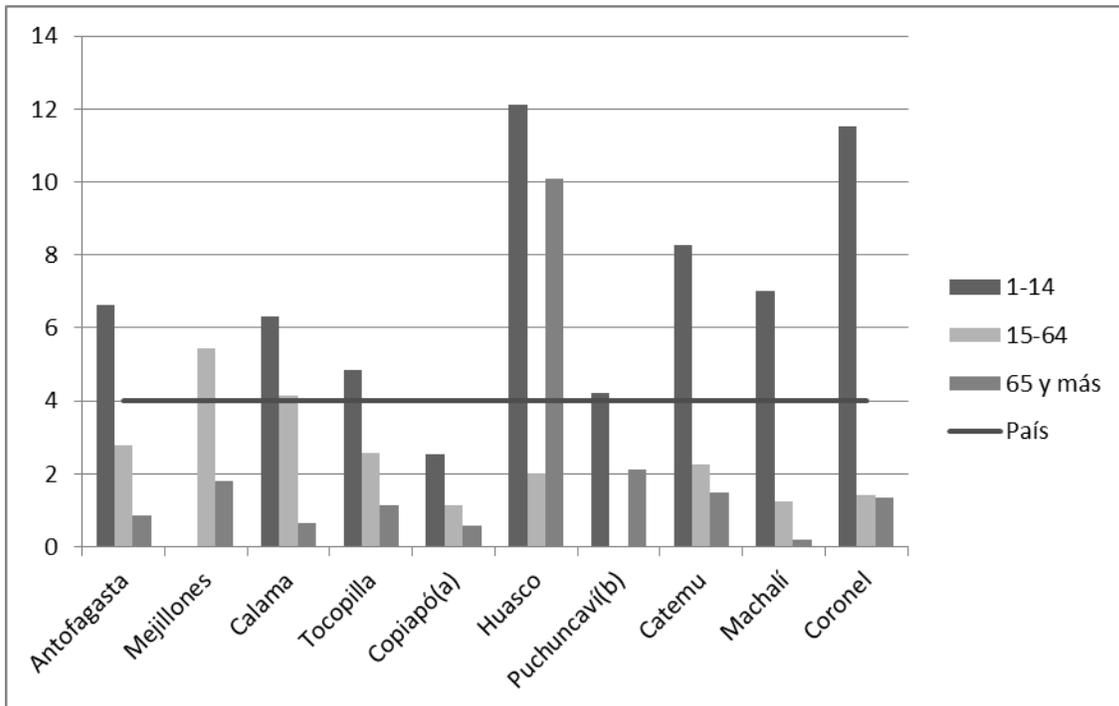
**Figura 221. Hospitalizaciones por Asma por cada 100.000 habitantes para hombres y mujeres. Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**



**Figura 222. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma por cada 100 mil habitantes para cada grupo etario (niños, adultos y adultos mayores). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

En la Figura 222 se observa la comparación por grupo etario y comparado con la media nacional las hospitalizaciones. Claramente resaltan Mejillones, Tocopilla, Huasco y Catemu respecto al número de hospitalizaciones en grupo etario trabajador. Esto nos da luces que mejoras en las condiciones atmosféricas reducirían las hospitalizaciones por asma, y mejorarían las condiciones de los trabajadores que perderían menos días de trabajo por cuadros asmáticos graves. Adicionalmente en 6 de las 10 comunas se supera el promedio del país para el grupo etario de 1 a 14 años, por lo que los niños, uno de los grupos más vulnerables será ampliamente protegido por la normativa en el caso de afecciones asmáticas graves.

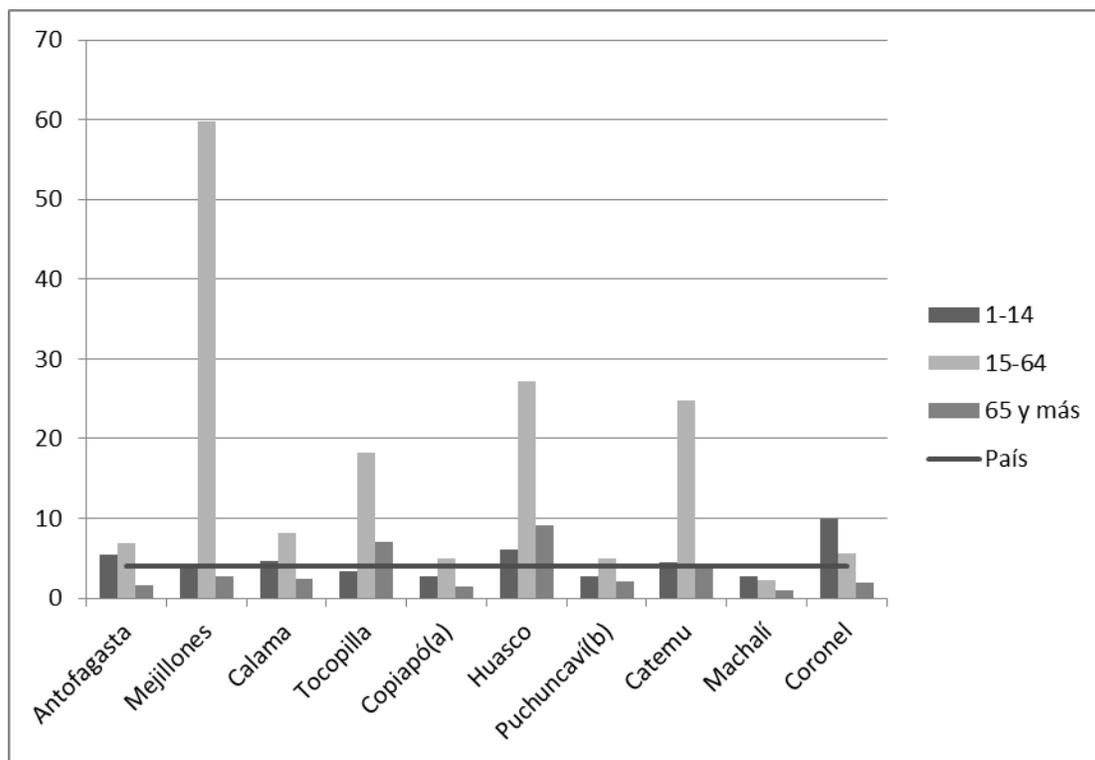
La Figura 223, a continuación, muestra el número de hospitalizaciones por asma. Se observa que comparado con la media nacional para los varones la mayoría del alto número de hospitalizaciones de hombres se concentran en los menores de 15, con excepción de Huasco donde también los adultos mayores presentan un alto índice de hospitalizaciones.



**Figura 223. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma para cada grupo etario (hombres). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

En el caso de las mujeres, como se muestra en la Figura 224, estas tienen un mucho mayor número de hospitalizaciones por cuadros asmáticos. Esto se hace patente en al menos 6 de las 10 comunas bajo estudio: Antofagasta, Mejillones, Calama, Tocopilla, Huasco y Catemu, en donde además se destaca que es la clase etaria trabajadora de 15 a 64 años la más impactada.

Lo anterior nos permite concluir que la normativa, respecto a la población adulta afectara positivamente a uno de los actores más vulnerables como son las mujeres, debido a la exposición al contaminante al que están expuestas.



**Figura 224. Promedio total de Hospitalizaciones por Asma para cada grupo etario (mujeres). Fuente: Elaboración propia a partir de Deis ([www.deis.cl](http://www.deis.cl)), Censo 2002 y 2012, y Encuesta Casen.**

### 5.4.3. Análisis de costo - beneficio

El análisis de costos y beneficios buscó identificar y cuantificar en términos monetarios todos los costos y beneficios generados por la norma.

Sin embargo, el tipo de datos disponibles para la realización de la evaluación es sólo en nivel de promedios, con datos históricos y no definido por las áreas específicas de las localidades, además de estar restringidos a impactos en salud. Con poca información son pocos los beneficios que se lograría monetizar de manera correcta, por lo que gran parte del análisis se debe realizar en el nivel de los impactos físicos.

Tomando en consideración que los beneficios de la norma de  $\text{SO}_2$  se producirán en poblaciones reducidas y emplazadas en lugares de contaminación excepcional, además de restringirse a episodios puntuales, la metodología de un análisis clásico de costos y beneficios, sólo permitió obtener indicaciones generales de impactos de reducir. La base conceptual para la cuantificación de beneficios fue la del daño evitado (es decir valorizar el daño que deja de ocurrir si se instala la norma), mientras que en los costos se puede tomar valores efectivos.

La ausencia de modelación prospectiva y detallada de los impactos asociados de cada concentración sobre la población, exigen hacer supuestos muy significativos sobre la magnitud de los impactos específicos de la norma y sólo permiten enfocarse en aspectos específicos de salud. De ese modo, las estimaciones podrían tener márgenes de error importantes.

Adicionalmente, dada la poca población en las localidades bajo estudio una monetización de impactos positivos en salud siempre serán relativamente “bajos”.

Dado lo anterior, la evaluación de costos y beneficios no permite obtener un resultado único y claro que aporte a identificar el valor social de “eficiencia” de la norma.

Sin embargo, es posible describir a un nivel general (de manera comparativa) cuáles son los tipos de impactos que genera esta norma desde esta perspectiva. Como se observa en la Tabla 80, es posible identificar 14 impactos sobre bienestar individual resultantes de las concentraciones que define la norma: ocho de ellos son impactos directos a las personas (impactos en salud), dos tienen un impacto indirecto sobre el bienestar material y cuatro efectos sobre sistemas.

En la tabla siguiente se hace una distinción según si es posible o no cuantificar estos beneficios.

Tabla 80. Descripción de Beneficios<sup>63</sup>.

Ámbito	Cuantificables	No cuantificables
Salud	Atenciones hospitalarias por problemas respiratorios	Mortalidad prematura
		Función pulmonar
		Exacerbación del asma
		Síndrome respiratorio agudo
		Otras visitas respiratorias a la sala de emergencias
Materialidad	Visitas a emergencia por cuadro asmático	Otras atenciones hospitalarias por problemas respiratorios
		Mejoras en la visibilidad
Sistemas Ambientales		Daño evitado a materiales
		Efectos evitados en los ecosistemas acuáticos por acidificación
		Efectos evitados en ecosistemas terrestres por deposición de azufre
		Disminución del efecto invernadero

De los 14 impactos identificados 12 no podrían ser cuantificados por falta de datos disponibles. Aunque un gran número de efectos adversos en la salud han sido asociados con exposición al SO<sub>2</sub>, el análisis de beneficios solo incluye un subconjunto debido a limitaciones de información y tiempo que no permitieron la cuantificación de los otros efectos. En este análisis solamente se tomó los beneficios para aquellos casos con datos para comparar tasas de incidencia de los impactos.

Los dos impactos que podrían ser cuantificados son:

1. visitas a emergencia por cuadro asmático, y
2. atenciones hospitalarias por problemas respiratorios.

En el análisis costo beneficio de la norma de SO<sub>2</sub> de la EPA (2010), se consideró también la cuantificación y monetización de *exacerbación del asma* y del *síndrome respiratorio agudo*, pero en este caso no se hizo por ausencia de datos.

La revisión epidemiológica así como el estudio de EPA (2010) concluyen que en algunos casos existe relación entre altas concentraciones de SO<sub>2</sub> y mortalidad prematura, función pulmonar, visitas a la sala de emergencias por otros problemas respiratorios, entre otros. Sin embargo, para muchos de estos casos es difícil atribuir efectos aislados de SO<sub>2</sub> o funciones dosis-respuesta que permitan hacer cuantificación precisa de los efectos del SO<sub>2</sub>. Debido a que la literatura en esta materia continua desarrollándose, esta decisión puede ser revisada en futuras evaluaciones de beneficios de la reducción de SO<sub>2</sub> atmosférico.

<sup>63</sup> La descripción de los beneficios sigue en general lo planteado en EPA (2010). Se debe notar que un impacto detectado en ese estudio, la reducción en la metilación de mercurio, no fue considerado como beneficio en este caso, ya que no existe suficiente información respecto del mecanismo en que una reducción en SO<sub>2</sub> reduciría la metilación de mercurio presente en el aire para el caso de Chile.

La mayor parte de los beneficios identificados que serán producidos por la norma de SO<sub>2</sub> está relacionada a los daños evitados debido a cuadros asmáticos y respiratorios. El promedio anual de urgencias respiratorias, como el promedio anual de hospitalizaciones por asma son una buena aproximación del impacto respiratorio de SO<sub>2</sub>, ya que como se mostró en el capítulo de epidemiología y toxicología, el impacto en salud del SO<sub>2</sub> es esencialmente respiratorio.

Como ya se comentó, no hay modelación proyectada de los impactos por lo que los beneficios “cuantificables” sólo pueden ser cuantificados esquemáticamente. Es decir, en ausencia de modelación de concentraciones asociadas que permitan cuantificar con precisión el impacto físico, se ha identificado el beneficio potencial de la norma considerando su efecto esperable en salud.

Los beneficios son de distinto tipo, los asociados a enfermedades respiratorias (analizados en función de las urgencias respiratorias y de las hospitalizaciones asmáticas), asociados a más horas de educación, más horas trabajadas, y beneficios al bienestar general. Hay indicios de que los grupos más vulnerables serán protegidos por la normativa, especialmente el grupo etario trabajador (de 15 a 64 años), y los niños y adultos mayores, respecto de enfermedades respiratorias agudas, en particular en las comunas de Tocopilla y Huasco.

Debe notarse que en esta perspectiva, lo relevante es el análisis de los beneficios obtenidos por la norma. La norma en si misma tiene costos que no son muy altos (desarrollo y seguimiento), mientras que los costos efectivos resultantes de la norma dependerán de la forma en que se implementen los procesos de descontaminación y por otra parte, ya fueron absorbidos en buena parte por los otros instrumentos regulatorios.

Es decir, la mayor parte de los costos generados por la normativa están asociados a costos de cumplimiento de las acciones “relacionadas” (norma de emisión de termoeléctricas, de fundiciones y planes de descontaminación). La siguiente tabla muestra la forma en que se distribuyen estos costos.

**Tabla 81. Repartición de costos entre instrumentos normativos.**

Instrumento	Tipos de costos			
	Costos administrativos de cumplimiento	Costos de cumplimiento (técnicas de control, medición)	Costo financieros que se pagan a través de multas (por no cumplimiento)	Costos de vigilancia
Planes de Descontaminación	Si	Si	Si	Si
Normas de emisión de termoeléctricas	Si	Si	Si	No
Normas de emisión de fundiciones de cobre	Si	Si	Si	No
Normas técnicas de	Si	Si	No	No

combustibles para el sector transporte e industrial				
Proyecto que ingresa al SEIA	Si	Si	Si	Si
Sistema de Evaluación Ambiental Estratégico	Si	Si	Si	Si
Estándares de la norma primaria de SO <sub>2</sub>	Si	No	No	Si

Fuente: Ministerio de Medio Ambiente

Por lo anterior, se puede argumentar que la norma misma no tendrá costos significativos.

Es importante observar la coherencia normativa entre estos instrumentos. La norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub> se relaciona con las normas de termoeléctricas y fundiciones porque estas últimas fijan estándares para la emisión de SO<sub>2</sub>. Así, son estas normas las que se llevarán el peso de la inversión económica que signifique para las empresas de ambas industrias implementar los niveles de emisión que estas normativas imponen. Debido a lo anterior, se puede decir que estas normas “tributan” hacia la norma primaria ya que ayudan a controlar los niveles de SO<sub>2</sub> en forma previa o conjunta a la implementación de la norma primaria.

Asimismo, existen dos instrumentos regulatorios que son tributarios de la norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub>: los planes de descontaminación y las evaluaciones de impacto ambiental, pues utilizan los estándares impuestos por la norma primaria para su ejecución.

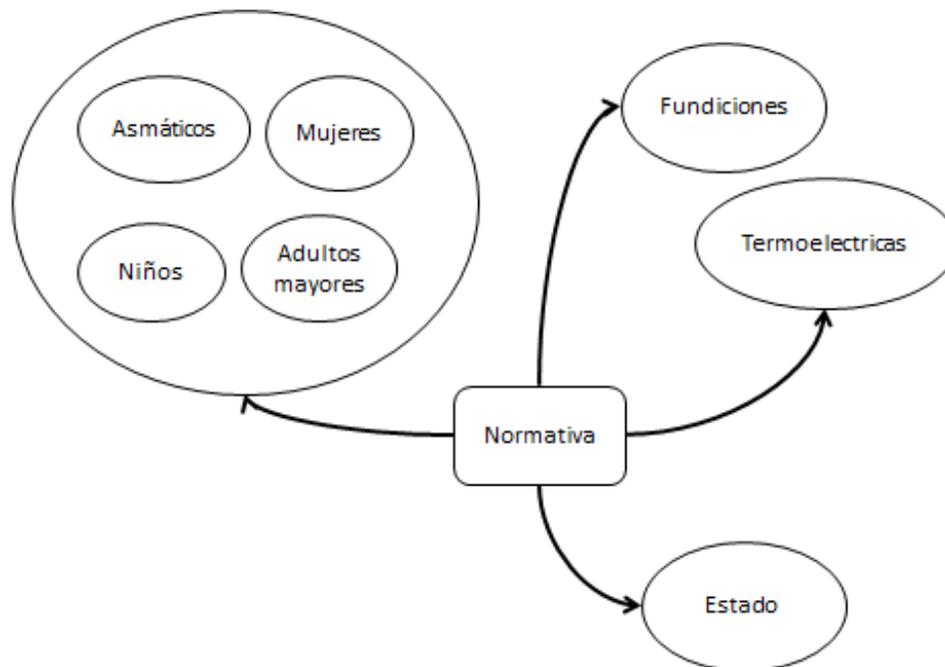
Desde el punto de vista distributivo, los efectos cuantitativos no son claros, por la falta de información ya mencionada, aunque sí es claro que los grupos beneficiados son aquellos económicamente vulnerables.

#### **5.4.4. Análisis socioeconómico**

No es fácil identificar las fuerzas que se verán afectadas por la normativa, al no existir claridad de las restricciones que impone la actual situación sobre el desarrollo de actividades económicas o sociales, sin un conocimiento detallado del tipo de actividades existentes<sup>64</sup>. Sin embargo, sólo es posible indicar que estos deberían ser en términos generales positivos.

<sup>64</sup> Existe información obtenida del Censo del 2002 sobre características generales de las comunas, pero sin encuestas específicas de actividad económica (en general las encuestas económicas y

Si se considera a los principales actores que serán impactados por la normativa (Figura 225) es posible esbozar algunos efectos.



**Figura 225. Actores Impactados por la normativa.**

Los aspectos principales que se han considerado relevantes para efectos de este análisis serán el potencial para el desarrollo de actividades económicas, para ampliar las posibilidades de trabajo y para mejorar las condiciones de bienestar social.

En el ámbito de las actividades económicas, se considera que será positiva al permitir más actividades económicas locales, en algunos casos podrá haber un impacto claro en actividades como la agricultura o el turismo, donde la norma tendrá beneficios sustantivos en el mejoramiento de las condiciones locales. Para las empresas emisoras, los costos que se derivan posteriormente en el proceso de implementación tienen una importante contrapartida al hacer más sostenible su funcionamiento en el largo plazo, mejorando las relaciones con la comunidad y con menor incertidumbre frente a cambios regulatorios futuros. Adicionalmente, posibles mejoras en las propias condiciones laborales y en sus costos generales por la ganancia de eficiencia que puede estar

---

sociales en Chile no se realizan a nivel comunal) no es posible mayor análisis. La información disponible muestra que, en términos de condiciones materiales, empleo y pobreza las condiciones de las comunas de interés no son tan distintos del país o de la región. Cabe notar que la información al estar considerada por comuna no apunta directamente a aquellos efectivamente afectados.

asociada a mejores prácticas ambientales. Sin embargo, la tendencia de estas fuerzas no es clara.

En cuanto a las posibilidades laborales, se debe sumar el hecho de que existirían más actividades económicas, con el hecho de que las mujeres son potencialmente más beneficiadas directa e indirectamente (por las atenciones a niños), abriendo mayores oportunidades laborales.

En cuanto al bienestar social, este debe considerarse de manera importante en términos de justicia ambiental (el tratamiento equitativo y un involucramiento significativo, de todas las personas sin importar raza, color, nacionalidad, o ingreso, con respecto con respecto al desarrollo, implementación y ejecución de leyes, normativas y políticas ambientales<sup>65 66</sup>). El concepto de equidad es clave y está en el programa de gobierno, por lo que se considera un elemento sustancial para analizar la norma.

Como los grupos más vulnerables son los más afectados por el SO<sub>2</sub>, la norma genera una base de equidad importante. Como se mostró anteriormente en el análisis de efectos en la salud, mujeres, niños, asmáticos y adultos mayores son los grupos más impactados por los efectos respiratorios del SO<sub>2</sub>, y por ello los grupos más sensibles son los más beneficiados por la norma de calidad primaria.

Para los grupos más vulnerables la norma tiene un efecto dinámico favorable pues mejora sus condiciones de vida permitiéndole acceso a más días de trabajo o estudio y también a un mayor bienestar general. Permite a estos grupos ser menos desfavorecidos frente al resto. Aunque los adultos en general no dejan de ser afectados por problemas respiratorios, son las mujeres las que sufren mayormente de casos asmáticos graves (con hospitalización), siendo el grupo más impactado entre los adultos.

Además, la norma permite revitalizar ciertas zonas generando indirectamente una mayor equidad social.

El sentido de justicia de las condiciones sociales se vería reforzado dado que actualmente el impacto por SO<sub>2</sub> es ciertas localidades específicas mientras que los

---

<sup>65</sup> Guidelines for Preparing Economic Analyses. Chapter 10. EPA, Mayo, 2014.

<sup>66</sup> Algunos de los criterios más importantes para un análisis de justicia ambiental son: identificación de población de minorías y comunidades vulnerables, identificación de población de bajos recursos, e identificación de comunidad con una carga ambiental desproporcionadamente alta. Para un análisis completo, además es necesario recolectar información demográfica, información del impacto, de la exposición al contaminante, y de datos de salud, para posteriormente desarrollar un análisis que involucra las siguientes etapas: (1) Delinear los límites de la comunidad bajo estudio y conducir un estudio preliminar de análisis de carga ambiental. (2) Comparar la demografía de la comunidad a una referencia estadística apropiada. (3) Determinar si la comunidad está compuesta de minorías o población de bajos recursos. (4) Desarrollar un perfil comprensivo de carga ambiental para cualquier comunidad que es minoría o población de escasos recursos. (5) Analizar si la carga es desproporcionalmente alta o adversa. (6) Reportar los resultados (Guidelines for Conducting Environmental Justice Analyses. EPA (<http://www.epa.gov/region2/ej/guidelines.htm>)).

beneficios de las actividades económicas no están directamente ligados a la comunidad.

Si se desglosa los costos y beneficios por tipo de actor, se ve claramente como esta norma contribuye a mayor equidad en el ámbito local.

**Tabla 82. Costos y beneficios identificados para actores relevantes.**

<b>Actor</b>	<b>Beneficios</b>	<b>Costos</b>
<i>Población</i>		
Niños	Más días de educación para niños	
	Más días de trabajo para padres	
	Mejores condiciones de vida para niños con problemas respiratorios	
Adultos mayores	Mejores condiciones de vida para adultos mayores con problemas respiratorios	
Asmáticos	Más días de trabajo para enfermos asmáticos	
	Mejores condiciones de vida para asmáticos	
Mujeres	Más días de trabajo para mujeres jefas de hogar	
	Mejores condiciones de vida para mujeres con problemas respiratorios	
<i>Industrias</i>		
Termoeléctricas		Implementación de la norma de termoeléctricas para SO <sub>2</sub>
		Implementación de la puesta en marcha de Plan de Descontaminación
Fundiciones		Implementación de la norma de fundiciones para SO <sub>2</sub>
		Implementación de la puesta en marcha de Plan de Descontaminación
<i>Estado</i>		
Servicios de Salud	Menores atenciones hospitalarias	
Ministerio del Medio Ambiente		Costos en Fiscalización
		Costos de tramitación de la normativa

#### 5.4.5. Conclusiones: Aspectos destacados

El presente estudio entrega elementos importante para la toma de decisión respecto de la norma de SO<sub>2</sub>, pese a las limitaciones de información y las características particulares de una norma que se inserta en el conjunto de otros instrumentos normativos.

Los aspectos destacados del estudio de impactos económicos y sociales de la norma de SO<sub>2</sub>, tanto considerando el enfoque de costos y beneficios como el socioeconómico, son los siguientes:

- No es posible comparar con precisión significativa los costos y beneficios de la normativa, dada la poca información disponible que es útil para estos efectos, pero es esperable que dada las “pequeñas” cantidades de personas afectadas, el balance de costos y beneficios no sea muy positivo o incluso sea negativo.
- No obstante, hay evidentes beneficios positivos para la población por la norma, fundamentalmente en salud.
- Los grupos beneficiados serán en general grupos vulnerables; tendrán más opciones de trabajo y laborales
- Hay mejoras potenciales en la relación entre empresa y comunidad y también en cuanto a la confianza y valoración del Estado, al entregar una herramienta normativa para regular un contaminante.
- Hay posibilidad de desarrollo positivo de largo plazo (más sustentable) y mayor diversificación productiva por mejores condiciones ambientales (abre nuevas opciones de desarrollo).
- Mejora la coherencia normativa, al permitir igualar las condiciones de protección para grupos que están afectados por diferentes contaminantes.
- Habrá ganancias ambientales en el territorio que actualmente está libre de contaminación por SO<sub>2</sub>, ya que la norma de calidad evitará impactos futuros graves<sup>67</sup>.
- La norma aumenta la equidad frente a la contaminación ambiental (justicia ambiental) que es básica para una sociedad democrática.

En cuanto a las opciones normativas, el presente análisis considera que, en general, lo medular es la existencia de la norma más que su valor específico. No obstante, hay razones para apoyar la propuesta intermedia desde varias perspectivas; a saber:

---

<sup>67</sup> Las ganancias ambientales se entiende en este contexto como externalidades positivas de una acción que no quedan directamente reflejadas en el impacto económico y social de la acción. Las ganancias ambientales no están internalizadas en el conteo de costos y beneficios clásicos.

1. Desde la perspectiva territorial la norma intermedia, al poner una restricción significativa a las emisiones en períodos cortos, evita las llamadas “zonas de sacrificio”, pero, al mismo tiempo, no es tan estricta como para incentivar la dispersión excesiva de las fuentes contaminantes en el territorio, protegiendo zonas que hoy no están sujetas a este contaminante.
2. Desde la perspectiva de salud, en particular desde la epidemiología, el escenario normativo mínimo de  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , no tiene efectos médicos evidentes en comparación con la norma media de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , por lo que desde el punto de vista médico ambas son equivalentes. Por otro lado, y desde el punto de vista toxicológico, el escenario normativo máximo de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , está demasiado cerca del AEGL-1, de  $520 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , que se propone como el primer nivel de gestión (alerta ambiental). Es por ello que no sería una herramienta efectiva para mantener a la población protegida, sin llegar con facilidad a la cantidad de  $520 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , concentración que presenta impacto a la salud de la población.
3. Desde la perspectiva institucional, el escenario normativo mínimo ( $197 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) es de difícil gestión. Una normativa demasiado estricta puede presentar problemas en su cumplimiento con mayor probabilidad de incumplimiento, lo que hace perder credibilidad en la población acerca de la eficacia de la norma y de la capacidad del Estado de hacerla cumplir. Por otro lado, el escenario normativo máximo ( $500 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), al estar tan cerca del AEGL-1, hace poco creíble el interés del Estado en la protección de los grupos más vulnerables, ya que estos quedarían expuestos a un nivel de contaminación muy cercano al primer nivel de cuidado.
4. Finalmente, en términos de coherencia normativa, los escenarios de  $197$  y  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  dificultan el objetivo global de un desarrollo sustentable que genere crecimiento económico, equidad y calidad de vida. El escenario demasiado restrictivo complica los Planes de Descontaminación y dificulta la entrada de nuevos proyectos a través del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. El escenario más laxo de  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , por otro lado, puede relajar la gestión exponiendo a más casos extremos a la población.

#### 5.4.6. Recomendaciones

El enfoque de costos y beneficios no solamente no se pudo aplicar de manera completa por la ausencia de información adecuada, sino que además difícilmente puede reflejar las implicancias de una norma, que más que un “proyecto”, es un marco habilitante para el desarrollo de actividades productivas con posibilidad de generar  $\text{SO}_2$ .

Si la autoridad eligiera la aproximación del Costo-Beneficio para su decisión, consideraciones tan importantes como la justicia territorial ambiental serían poco relevantes (debido a que, muy probablemente, habría ganancias económicas negativas, por la baja proporción de personas beneficiadas por la normativa en las localidades bajo estudio. Tampoco se podría tomar en cuenta el marco de incertidumbre general que se vincula con la norma.

La aproximación socioeconómica permite incorporar en la decisión objetivos como inclusión, justicia ambiental, cohesión social y equidad, conceptos importantes para un desarrollo sustentable, y considerado en las estrategias gubernamentales actuales. Este enfoque da espacio a visiones que exploren posibilidades más vastas de estas normativas.

Bajo esta perspectiva, se recomienda adoptar la norma de SO<sub>2</sub> del escenario intermedio al contribuir no sólo a más oportunidades de actividad económica y laboral, sino además a una mejor gestión, eficiencia y equidad territorial, mayor justicia ambiental y cohesión social (confianza en las instituciones).

## 6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.1. Introducción

Una de las causas de contaminación más importante en Chile, que aún se mantiene, es la contaminación por SO<sub>2</sub>. Esto se debe a la presencia de megafuentes que emiten este contaminante, principalmente las fundiciones de cobre, que si bien han hecho un esfuerzo sostenido a través de los planes de descontaminación iniciados en la década de los noventa, aún impactan el aire, y las termoeléctricas, que en una cantidad apreciable, han incrementado sus emisiones durante la presente década.

CONAMA estableció en el año 2003 el Decreto Supremo 113 fijando la Norma Primaria de Calidad del Aire para Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>). El Ministerio del Medio Ambiente cumpliendo con lo establecido por la Ley 19300 ha iniciado su proceso de revisión y el presente estudio tiene por finalidad apoyar con información científica y técnica dicho proceso.

Un aspecto relevante revisado en este estudio, fue analizar la conveniencia de incluir una nueva resolución temporal a la norma de SO<sub>2</sub> actualmente vigente, que solamente contemplaba una exposición a escala temporal anual y diaria. De modo de ajustar la normativa a su objetivo primordial, que es proteger la salud de las personas, se plantea incluir una norma horaria.

El Centro Nacional del Medio Ambiente, enmarcado en su política de estudio frente a las grandes problemáticas ambientales del país, participó con otras instituciones, en la investigación de la contaminación por SO<sub>2</sub> del área de Puchuncaví y Ventanas durante el año 2012. Condujo un estudio específico<sup>68</sup> en el cual se propusieron niveles horarios de regulación (197, 350 y 500 µg/m<sup>3</sup>N) que dieron como resultado niveles de calidad del aire gestionables para esa realidad, y son los que fueron utilizados en acuerdo con el MMA como escenarios para esta revisión normativa.

Los niveles antes mencionados fueron evaluados en el presente estudio, con datos provenientes de mediciones reales de 10 zonas priorizadas por el MMA, de modo de estimar el nivel de cumplimiento y los riesgos a la salud que ellos conllevan.

A continuación se presenta los fundamentos de la Propuesta:

---

<sup>68</sup> “Evaluación de Exposición Ambiental a Sustancias Potencialmente Contaminantes Presentes en el Aire, Comunas de ConCón, Quintero y Puchuncaví” (Licitación 608897-124-LP11) Subsecretaría del Medioambiente, Abril 2013.

## 6.2. Gobernanza y política pública

### 6.2.1. Gobernanza

La buena Gobernanza se puede entender como la mejor forma de gobernar, a diferentes escalas. Aspectos de Gobernanza que se consideran en el análisis de la política pública son (1) orientación al consenso, es necesario en las democracia y busca aunar opiniones en torno a soluciones consensuadas, (2) da cuenta de todas las acciones realizadas y decisiones tomadas, y en base a qué criterios fueron realizadas, (3) transparencia, necesaria para una gestión exitosa en toda democracia, (4) da respuesta, enfrenta los problemas con ciertos criterios que permiten encontrar soluciones a problemas de política pública, (5) equitativa e inclusiva, ya que busca como meta la inclusión de actores vulnerables e impactados por el problema a resolver, (6) efectiva y eficiente, al incluir algunos criterios de las ciencias económicas basadas en óptimos de Pareto, (7) participativa, al buscar incluir actores que generalmente están impedido de participar en decisiones de política pública, y (8) orientado al consenso, busca de forma inclusiva, como se dijo antes llegar a acuerdos consensuados entre los diferentes actores relevantes a la política pública en la sociedad. Esto se muestra en la Figura 226.

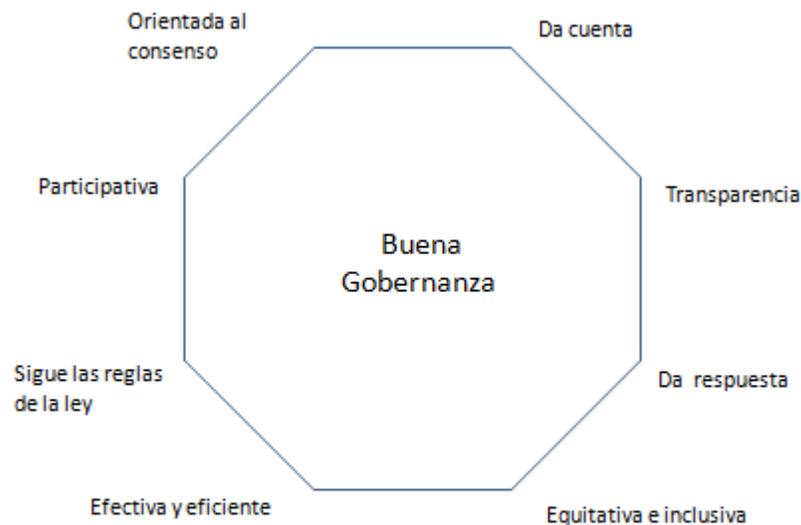


Figura 226. Figura en que se observan los ocho aspectos fundamentales de la buena gobernanza según Crabbe & Leroy, 2008 (UNESCAP, 2008).

### 6.2.2. Evaluación de política pública

Con el advenimiento del neoliberalismo y el nuevo manejo público durante la década de los ochenta y noventa, la economía (negocios) llega a ser la perspectiva más importante desde donde se evalúan las políticas públicas. El resultado llega a ser visto cada vez más como el criterio clave. Se enfatiza el resultado, sin importar demasiado los criterios y metodologías usadas para llegar a ese resultado.

En los hechos no es el caso solamente de la evaluación de política pública, sino también el desarrollo de la política pública: la actuación del gobierno, o la clase de cuerpo administrativo autónomo que fueron envolviéndose cada vez más, en la implementación de la política pública, es llevado a cabo con el uso de indicadores. El resultado es realización de contratos; el subsidio es hecho en la base a esos resultados. En el mundo académico se refieren a este tipo de evaluación como “administrativa” aludiendo a sus primeros estados, o “económica” o aún “gestión” aludiendo a sus últimos estados y al actual (Crabbe & Leroy, 2008<sup>69</sup>).

Durante los años ochenta, se adicionaron a la efectividad, otros aspectos como la legitimidad de la intervención del gobierno. En consecuencia la evaluación de la política pública llega gradualmente la aplicación de criterios como legitimidad, participación, aceptación y capacidad de dar respuesta (Crabbe & Leroy, 2008).

Desde la perspectiva de la ciencia política se ha señalado que las políticas públicas se basan en más de un motivo racional o básico (Crabbe & Leroy, 2008). De modo general se distinguen tres aproximaciones racionales subyacentes en las políticas públicas:

- i) una jurídica o racional judicial;
- ii) una racional económica (a veces descrita como una racional de negocios);
- iii) una racional política.

Sin suponer una relación *uno a uno*, son los tres tipos que emergen de la historia de evaluación de políticas ambientales. La racional jurídica está relacionada a las reglas de la ley y a los principios de buena gobernanza. Los criterios tradicionales de evaluación de políticas, por una oficina auditora están en la línea de ese criterio. Se debe respetar los derechos, mantener el orden y la ley etc.

En contraste racional económica o de negocios está centrada en la meta de la política pública, efectividad y eficiencia. Muchas de las herramientas de gestión están en la línea de este criterio.

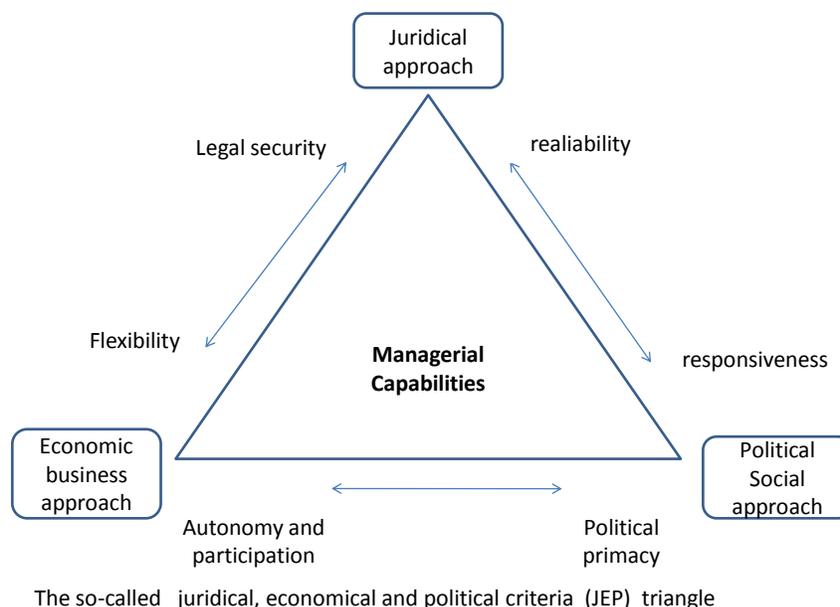
La racional política, se refiere a los principios, al centro de la democracia, representación; mandato y rendición de cuentas; accesibilidad, apertura; transparencia y participación, etc. Esta racional encuentra expresión en los derechos políticos y libertades, en la separación de los poderes, en las limitaciones del poder del gobierno,

---

<sup>69</sup> The handbook of environmental policy evaluation. A. Crabbé, P. Leroy - 2008

en la legitimidad de las formuladores de políticas. Las tres racionales se encuentran invariablemente en el debate político (Crabbe & Leroy, 2008).

El modelo se representa en la Figura 227.



**Figura 227. Triángulo de criterios jurídicos económicos y políticos para políticas públicas.**

### 6.2.3. Discusión de Aproximaciones Económicas para los proyectos públicos

Las ciencias económicas pueden entenderse como divididas en economía tradicional o neoclásica, economía política y economía ecológica<sup>70</sup>. Cada una de estas aproximaciones son complementarias, y en general se aplican a preguntas diferentes en temáticas distintas. Para la evaluación de proyectos el enfoque de la economía tradicional es el análisis costo-beneficio (basado únicamente en la eficiencia de Pareto), mientras que para la economía política, el enfoque básico es el análisis institucional, finalmente para la economía ecológica el enfoque más extendido es el análisis multicriterio.

<sup>70</sup> Economía Ecológica. Joan Martinez-Alier.

De acuerdo a los lineamientos del programa de gobierno, que favorecen la inclusión social, la equidad, la justicia ambiental, la igualdad de género, y la democracia, la aproximación de la política económica y de la economía ecológica son las más útiles para la toma de decisiones porque periten incluir conceptos y criterios de análisis más amplios que la economía neoclásica, basada solamente en el análisis costo beneficio, que en casos de toma de decisión complejos no recoge todas las aristas del problema en cuestión y tiende a sobre simplificar el análisis.

De acuerdo a lo anterior para desarrollar la gestión de gobierno es mucho más conveniente, basarse en criterios amplios que recojan una parte importante de la complejidad ambiental y social de la evaluación de una norma de SO<sub>2</sub> a nivel nacional. Es por ello que recomendamos la aproximación de la economía política y la economía ecológica como base de la toma de decisiones al respecto.

#### **6.2.4. Limitaciones del Análisis Costo Beneficio**

Existen dos grandes limitaciones en el enfoque usando el método de análisis costo beneficio (ACB): las metodológicas o técnicas, y las conceptuales.

Las limitaciones conceptuales están dadas por los supuestos que existen detrás del ACB que muchas veces no están explícitos. Estos supuestos, son los propiamente microeconómicos (ver más adelante las imperfecciones del mercado), y el importante supuesto relacionado a la prioridad que se da al criterio económico por sobre criterios, como los criterios técnicos (ambientales, sanitarios, etc.), los criterios judiciales, y los criterios políticos, -los que fueron sintetizados en la sección anterior. En el ACB adicionalmente, se busca dar un indicador único que resume todos los beneficios y costos, esto elimina la capacidad de visualizar las complejidades de los sistemas sociales, con lo que se pierde valiosa información para la toma de decisiones.

Las limitaciones técnicas que presenta el ACB, algunas de las cuales ya se señalaron en el capítulo de análisis socioeconómico. En primer lugar están relacionadas a la amplia necesidad de datos para el cálculo de los valores de costos y beneficios, que en la mayoría de los casos son escasos, y no son suficientes para desarrollar un ACB como lo dicta la metodología.

Además está el problema de elección en la tasa de descuento, ya que se ha demostrado que a altas tasas de descuento, es casi imposible encontrar beneficios sociales en los proyectos, al descontar los flujos futuros. A mayores tasas de descuento (5% - 8%) mayor es el descuento del futuro, y por lo tanto los beneficios y costos sociales con un perfil temporal de más de 50 años desaparecen del proyecto, lo que conlleva la falsa idea de que el proyecto social no debe ser realizado.

La gran mayoría de los proyectos sociales, y en particular los ambientales, los efectos de la política pública ocurrirán en el mediano y largo plazo, y muchos no serán evidenciados en el corto plazo. Es por ello que el enfoque de ACB, no es una buena herramienta para la evaluación de este tipo de proyectos.

Finalmente, una fuerte crítica de la economía ecológica hacia el ACB es que al intentar transformar todos los beneficios y costos en un solo indicador monetario, se pierde información y significado de todos los impactos que no son posibles de monetarizar (en muchos casos, la gran mayoría de ellos), y además se pierde profundidad en la complejidad del problema de política pública en cuestión.

### **Las imperfecciones del mercado**

En nuestra sociedad se argumenta que el mecanismo preferido para guiar las actividades sociales y económicas es el mercado, y para realizar decisiones sociales y económicas es el mercado privado. Una red descentralizada de transacciones privadas a través de las cuales la información de las preferencias individuales se imparte. Teóricamente un buen funcionamiento del mercado tiene dos características importantes; i) un mercado perfecto es económicamente eficiente, ii) es consistente con los valores libertarios, las transacciones en un mercado perfecto son completamente voluntarias. Este mercado debe cumplir con 4 aspectos básicos: i) no debe generar externalidades; ii) los participantes en el mercado tienen información perfecta; iii) el mercado debe ser perfectamente competitivo; iv) requiere de una definición de parámetros distribucionales y éticos para que sea socialmente aceptable.

En la práctica, estos supuestos no se cumplen en la sociedad actual, ya que los consumidores están lejos de tener información perfecta acerca de los productos, así como muchos productores no tienen buena información de los insumos. Esta lógica se expande para casi todos los supuestos básicos de la teoría microeconómica en el ACB.

### **Dificultades de aplicación del ACB en la política ambiental**

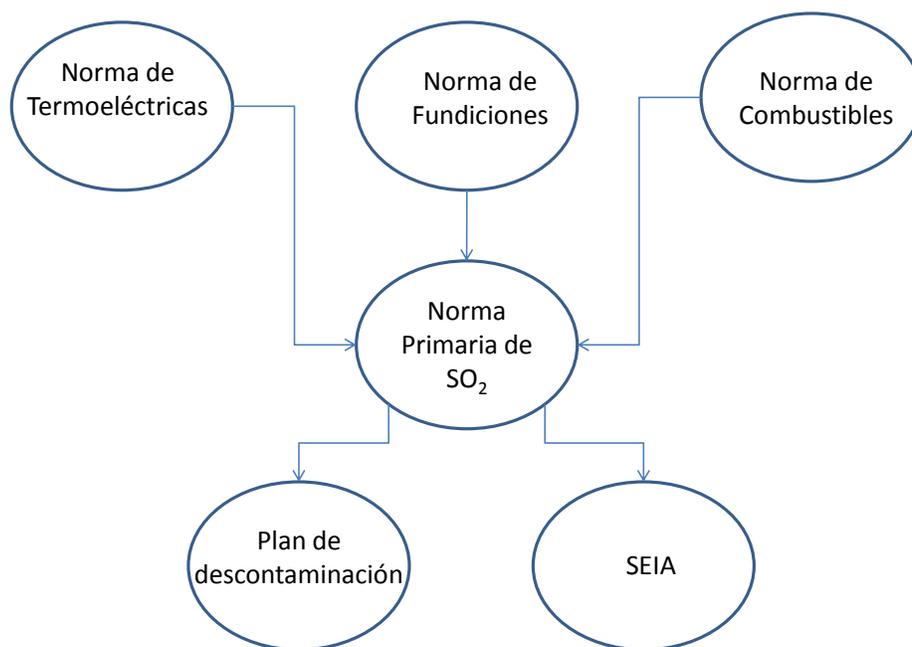
En un estudio de los documentos de análisis de regulaciones ambientales en la EPA (Hahn, 2007) se encontró que la información económica fundamental no está reportada en la mayoría de los casos, incluyendo información de política pública relevante e información sobre los beneficios netos. Los análisis de la EPA frecuentemente no entregan información adecuada a las regulaciones propuestas para justificar las decisiones para proceder con esas regulaciones. La ausencia de información sobre los beneficios netos es especialmente desafortunada, porque está estrechamente ligada a las metas de la orden ejecutiva. (Hahn, 2007<sup>71</sup>).

---

<sup>71</sup> How Well Does the U.S. Government Do Benefit-Cost Analysis? Robert W. Hahn and Patrick M. Dudley \*Review of Environmental Economics and Policy, volume 1, issue 2, summer 2007, pp. 192–211

### 6.2.5. Análisis Institucional: Coherencia Normativa

Debido a que la nueva norma primaria de SO<sub>2</sub> involucra el desarrollo conjunto a otros instrumentos normativos, es necesario desarrollar un breve análisis de coherencia normativa entre cada uno de los instrumentos relacionados.



**Figura 228. Muestra la relación de la norma primaria de SO<sub>2</sub> respecto a las otras normas que reducen concentraciones de SO<sub>2</sub>.**

La norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub> se relaciona con las normas de termoeléctricas y fundiciones porque estas últimas fijan estándares para la emisión de SO<sub>2</sub>. Así, son estas normas las que se llevarán el peso de la inversión económica que signifique para las empresas de ambas industrias implementar los niveles de emisión que estas normativas imponen. Debido a lo anterior, se puede decir que estas normas tributan (Figura 2) hacia la norma primaria ya que ayudan a controlar los niveles de SO<sub>2</sub> en forma previa o conjunta a la implementación de la norma primaria.

Asimismo, como se muestra en la Figura 228, existen dos instrumentos regulatorios que son tributados desde la norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub>, los planes de descontaminación y las evaluaciones de impacto ambiental. Estos instrumentos utilizan

los estándares impuestos por la norma primaria para su ejecución. Es por ello que en este caso es la norma primaria la que tributa hacia estos instrumentos.

### 6.2.6. Justicia Ambiental

La justicia ambiental se define como el tratamiento equitativo y un involucramiento significativo, de todas las personas sin importar raza, color, nacionalidad, o ingreso, con respecto con respecto al desarrollo, implementación y ejecución de leyes, normativas y políticas ambientales<sup>72</sup>.

Algunos de los criterios<sup>73</sup> más importantes para realizar un análisis de justicia ambiental son: identificación de población de minorías y comunidades vulnerables, identificación de población de bajos recursos, e identificación de comunidad con una carga ambiental desproporcionadamente alta. Para desarrollar un análisis completo de justicia ambiental, además es necesario recolectar información demográfica, información del impacto, de la exposición al contaminante, y de datos de salud, para posteriormente desarrollar un análisis que involucra las siguientes etapas: (1) Delinear los límites de la comunidad bajo estudio y conducir un estudio preliminar de análisis de carga ambiental. (2) Comparar la demografía de la comunidad a una referencia estadística apropiada. (3) Determinar si la comunidad está compuesta de minorías o población de bajos recursos. (4) Desarrollar un perfil comprensivo de carga ambiental para cualquier comunidad que es minoría o población de escasos recursos. (5) Analizar si la carga es desproporcionalmente alta o adversa. (6) Reportar los resultados.

### Espacialización de los impactos sobre los actores en el territorio

Investigaciones recientes muestran la importancia y las oportunidades sustantivas para el uso de la información espacial en aspectos como la salud pública y ambiental. El uso de los sistemas de información geográfica, permite una acción más efectiva y localizada del gobierno en el desarrollo de las políticas públicas tanto de salud como ambientales, permitiendo una mejor equidad y justicia ambiental para los grupos más vulnerables de la población. La adecuada espacialización de los impactos, de las emisiones de SO<sub>2</sub>, para la norma en estudio proveen de información valiosa para la autoridad sanitaria, como para la administración del territorio, basado en las comunas, mejorando los aspectos de participación, consenso, transparencia, equidad e inclusión que importan en la gobernanza local<sup>74</sup>.

### 6.2.7. Ganancias Ambientales

<sup>72</sup> Guidelines for Preparing Economic Analyses. Chapter 10. EPA, Mayo, 2014.

<sup>73</sup> Guidelines for Conducting Environmental Justice Analyses. EPA (<http://www.epa.gov/region2/ej/guidelines.htm>).

<sup>74</sup> Use of Spatial Analysis to Support Environmental Health Research and Practice Marie Lynn Miranda, Sharon E. Edwards. N C Med J. 2011;72(2):132-135.

Las ganancias ambientales son externalidades positivas producidas en un proyecto, más allá de las ganancias económicas que el proyecto en cuestión involucra. Las ganancias ambientales no están internalizadas en el conteo de costos y beneficios involucrados típicamente en los análisis costo-beneficio, por lo que suelen pasarse por alto con este tipo de aproximación. Sin embargo, en algunos tipos de proyectos, especialmente aquellos con gran impacto social y medio ambiental, las ganancias ambientales pueden ser un factor detonante en la toma de decisión de política pública. Un caso interesante que tomo esta aproximación fue el Análisis de Beneficios del Plan de Saneamiento de Aguas Servidas<sup>75</sup> de la RM realizada en Aguas Andinas, en donde fueron contabilizados, todos los beneficios no incluidos en el proyecto original, que tenía un objetivo exclusivamente sanitario. Estos beneficios no son producidos directamente a través de los objetivos del proyecto sino que son externalidades positivas, ejemplos de estos beneficios son: recuperación de la cuenca hidrográfica, disponibilidad de agua para riego, reducción de olores, recuperación de la biodiversidad, entre otros.

En particular, al normar el SO<sub>2</sub> involucra el despliegue de estas ganancias ambientales en muchas partes del territorio nacional, ya que se está regulando a niveles que (i) permiten la protección de la población, (ii) permite manejar y gestionar los niveles de concentraciones de SO<sub>2</sub> cuando lleguen a niveles que puedan representar un peligro para la población, (iii) evita zonas de sacrificio, y (iv) produce coherencia normativa con otras regulaciones ambientales como las normas de emisión y combustibles, los planes de descontaminación y el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Esto ocurriría debido a que existe una línea base de niveles de SO<sub>2</sub> dictados por las normas de emisión. Son estas normativas de emisión, como se mencionó anteriormente, son las que se llevarán gran parte de los costos de implementación de bajar los niveles de SO<sub>2</sub>, así como los proyectos particulares que entren al SEIA.

Es importante resaltar que una gran cantidad de las ganancias ambientales se darán especialmente en la mayoría del territorio nacional que está libre de contaminación por SO<sub>2</sub>, ya que la norma de calidad en aquellos lugares se cumplirá automáticamente, y por lo tanto, al evitarse daños e impactos mayores. En aquellos casos, existirán solo ganancias con la implementación de la normativa de SO<sub>2</sub>.

### **6.2.8. Aproximación Multicriterio para la decisión de escenarios de calidad del Aire**

Este análisis cualitativo está basado bajo un importante supuesto: todos los criterios presentan el mismo valor para la autoridad y la población, los criterios no tienen pesos relativos, o en otras palabras todos los criterios pesa lo mismo.

Es relevante destacar que son estos criterios los que representan una propuesta a la autoridad, y que estos criterios son justamente los que pueden ser discutidos por la autoridad, así como su peso relativo, para tomar una decisión de política pública respecto de los escenarios normativos.

---

<sup>75</sup> Tesis. Bióloga Ambiental. Facultad de Ciencias. Universidad de Chile 2003.

**Tabla 83. Resumen de la análisis cualitativo de los criterios identificados para la recomendación de un escenario normativo.**

Criterios	Análisis Socioeconómico		
	Escenario 1 (197 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Escenario 2 (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )	Escenario 3 (500 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )
Territorial	+1	+1	+1
Gestión	-1	+1	-1
Salud	+1	+1	0
Coherencia Normativa	-1	+1	-1
Justicia Ambiental	+1	+1	+1
Cohesión Social	+1	0	-1
<b>Total</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>-1</b>

El análisis cualitativo de la Tabla 83 fue designado en función de si cada criterio representa un beneficio (+1) o no (0) o representa un perjuicio (-1) respecto de cada escenario normativo. En el caso del criterio territorial, todos los escenarios normativos representan un beneficio, y por lo tanto no es un criterio útil para discernir. En el caso del criterio Gestión, para el escenario 1 es negativa porque es muy difícil de fiscalizar y monitorear un nivel tan restrictivo, en el caso del escenario 3, pero desde el punto de vista de los planes de descontaminación y su cercanía al AEGL-1 representa un perjuicio respecto de los otros escenarios. Para Salud, solo el escenario 3 (500  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ) no representa beneficio, ya que está muy cerca del límite en que se presentan efectos en salud (520  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ). Coherencia Normativa, los dos escenarios más restrictivos representan beneficios, para el escenario 3, hace difícil la gestión con los planes de descontaminación. Justicia Ambiental, este también es un criterio pobre, ya que a través de este criterio no es posible discernir si el escenario es mejor o peor que la segunda mejor alternativa. Todos los escenarios representan beneficios. Cohesión Social, un escenario 1 aumenta la cohesión social porque la gente informada va a preferir una normativa más restrictiva. Mientras que el escenario dos al ser un nivel intermedio, no presentaría efectos sobre la cohesión social, para finalmente el escenario 3 disminuir la cohesión social porque la gente al saber que se seleccionó la norma más laxa se siente defraudada por las autoridades.

El breve análisis anterior, sugiere que el escenario 2, parece el más recomendable porque, en un formato en el que todos los criterios usados tienen igual peso, es el que genera mayor beneficios sociales y ambientales. Siendo al mismo tiempo, el escenario 3 el peor evaluado ya que de los seis criterios, se obtienen beneficios totales negativos.

### 6.3. Enfoques normativos para la propuesta de escenarios

Un objetivo del presente estudio fue avanzar en la protección de la salud de la población mediante la incorporación del conocimiento científicamente probado, y manteniendo la característica de la regulación ambiental en Chile, que se ha caracterizado por

establecer regulación ambiental acorde con la capacidad económica y tecnológica del país, lo que se mantiene en esta revisión.

Respecto de la revisión de los antecedentes internacionales, epidemiológicos, toxicológicos y de análisis comparativo de regulaciones en distintos países, se concluye que los valores de la norma actual no logran el objetivo de protección a la salud pública buscado, por lo que resultó imperativo evaluar escenarios de reducción tanto para los valores diarios y anuales en uso, como incluir los niveles horarios antes mencionados.

Es así como, desde un punto de vista de la calidad del aire en las localidades priorizadas, se analizó sistemáticamente el número de superaciones (horarias, diarias y anuales) para los siguientes niveles:

Norma anual: se evaluó su derogación, su mantención en el nivel actual ( $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y su reducción a  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>76</sup>.

Norma diaria: Se analizaron los niveles de  $125$ ,  $50$  y  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , es decir, solo escenarios de reducción, acorde con el análisis comparativo de norma a nivel internacional, pues la norma actual contempla  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de promedio diario.

Norma horaria: Se seleccionaron los niveles de  $500$ ,  $350$  y  $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Los resultados del análisis del comportamiento de estos niveles en las localidades priorizadas, permite establecer que:

- Respecto al escenario más estricto para la norma anual ( $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se sobrepasaría en Quintero, Santa Margarita, Sur y Tocopilla (4 localidades de 10). No existe consistencia entre la evidencia epidemiológica y la toxicológica que sustenten los efectos crónicos sobre la salud de la población, por lo que una reducción de esa magnitud no aportaría beneficios en salud.
- El escenario más restrictivo de todos es el  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , (norma diaria) ya que por ejemplo, las localidades de Catemu y Antofagasta, este nivel se sobrepasaría sobre un 80% de los días, sin tener beneficios claros para la salud de las personas, por tratarse de valores extremadamente bajos de inmisión y no considerar la ventana de exposición que provoca los efectos deletéreos en la salud, que es la horaria.
- Con respecto a la norma horaria para el nivel horario más estricto ( $197 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en Antofagasta (La Negra) y en Puchuncaví se sobrepasarían 1300 horas en forma independiente, lo que equivale a 50 días acumulados al año. Desde un punto de vista de la salud no incrementa los beneficios de niveles menos estrictos como es el de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

---

<sup>76</sup> Norma Mexicana.

### 6.3.1. Resumen de propuestas norma primaria SO<sub>2</sub> considerando criterios y niveles

A continuación se presenta un resumen del análisis de las propuestas de niveles considerando la calidad del aire, la salud de las personas y el impacto socioeconómico. Este análisis cualitativo consideró la respuesta de cada una de las alternativas para la peor situación existente.

**Tabla 84 Niveles de concentración horaria analizados según criterios**

Criterios	Niveles de concentración horaria SO <sub>2</sub>		
	197 µg/m <sup>3</sup> N	350 µg/m <sup>3</sup> N	500 µg/m <sup>3</sup> N
Criterios de Calidad del Aire	En el peor de los casos, el número de superaciones independientes de este nivel, se encuentra en torno al 15% del total de horas de un año.	En el peor de los casos, el número de superaciones independientes de este nivel, no supera el 10% de las horas totales de un año.	En el peor de los casos, el número de superaciones independientes de este nivel, no supera el 8% de las horas totales de un año.
Criterios de Salud	Nivel sin significado toxicológico, se encuentra bajo el Nivel de Efecto Observado.	Nivel que protege ampliamente a la población general y pacientes asmáticos. Validado por estudios toxicológicos.	Nivel que protege a población general, pero no evita la aparición de efectos adversos en personas susceptibles, validado por estudios toxicológicos.
Criterios Socioeconómicos	Nivel extremadamente bajo, no produce efecto biológico en humanos, por lo que no presenta mayor beneficios en la salud que el nivel siguiente evaluado.	Este nivel reporta los mayores beneficios a la población.	Este nivel no es recomendable, ya que aporta niveles muy bajos de beneficios a la población y es una cifra que se encuentra muy cercana al AEGL-1, por lo que sería una opción poco costo-eficiente.

**Tabla 85 Niveles de concentración diaria analizados según criterios**

Criterios	Niveles de concentración diaria SO <sub>2</sub>		
	20 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>
Criterios de Calidad del Aire	En el peor de los casos, más de 340 días, del total de días de un año, se encontrarían sobre	En el peor de los casos, más de 250 días, del total de días de un año, se	En el peor de los casos, cerca de 100 días, del total de días de un año, se encontrarían sobre

Criterios	Niveles de concentración diaria SO <sub>2</sub>		
	20 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	125 µg/m <sup>3</sup>
	este nivel.	encontrarían sobre este nivel.	este nivel.
Criterios de Salud	Nivel extremadamente bajo, que no muestra evidencia epidemiológica ni toxicológica de beneficio a la salud.	Nivel bajo, que no muestra evidencia epidemiológica ni toxicológica de beneficio a la salud.	Existe evidencia epidemiológica de reducción de la mortalidad, valor establecido por OMS en el año 2000.
Criterios Socioeconómicos	NC	NC	NC

NC: No Cuantificado. La evaluación económica y social se realizó sobre la base de efectos agudos en consultas de emergencia y hospitalizaciones por bronquitis obstructiva y asma.

**Tabla 86 Niveles de concentración anual analizados según criterios**

Criterios	Niveles de concentración anual SO <sub>2</sub>		
	66 µg/m <sup>3</sup>	80 µg/m <sup>3</sup>	Dejar sin efecto la norma
Criterios de Calidad del Aire	En el peor de los casos, solo 4 de 10 zonas (localidades) en el país, estarían superando este nivel.	En el peor de los casos, solo 3 de 10 zonas (localidades) en el país, estarían superando este nivel.	De las 10 zonas (localidades) estudiadas, 4 presentarían promedios anuales mayores a 64 µg/m <sup>3</sup> , y el resto bajo este nivel.
Criterios de Salud	No existen antecedentes que indiquen ganancia en salud a estos niveles.	Tomando en cuenta antecedentes epidemiológicos, este nivel estaría disminuyendo dichos riesgos.	Nuevos estudios epidemiológicos estarían indicando posibles efectos crónicos, por lo que derogar implica aumentar el riesgo de ellos.
Criterios Socioeconómicos	NC	NC	NC

NC: No Cuantificado. La evaluación económica y social se realizó sobre la base de efectos agudos en consultas de emergencia y hospitalizaciones por bronquitis obstructiva y asma.

El análisis de la implicancia de las distintas alternativas de valores para la norma diaria y la anual y la inclusión de valores horarios, considerando su comportamiento en la calidad del aire históricamente medida, en la salud de la población y su implicancia económica y social permite concluir y o recomendar que:

- Para dar cuenta adecuadamente del objetivo de la norma primaria, que es proteger la salud de la población, se debe incorporar un valor horario.
- El nivel actual de la norma diaria resulta ser excesivamente laxo, pues no permite proteger de efectos señalados internacionalmente de muertes prematuras asociadas al contaminante.
- Si bien los efectos crónicos del SO<sub>2</sub> son debatibles por la falta de consistencia entre los hallazgos epidemiológicos y los toxicológicos, se puede recomendar aplicar principio precautorio y no derogar la norma anual actualmente vigente.

Estos tres grandes criterios desglosados en escenarios normativos, permiten en síntesis proponer lo siguiente:

- Norma Horaria: Incorporación de una norma horaria en un nivel de 350 µg/m<sup>3</sup>
- Norma Diaria: Reducción de nivel de la norma diaria desde 250 a 125 µg/m<sup>3</sup>
- Norma Anual: Mantención de la norma anual en 80 µg/m<sup>3</sup>

#### 6.4. Niveles de emergencia

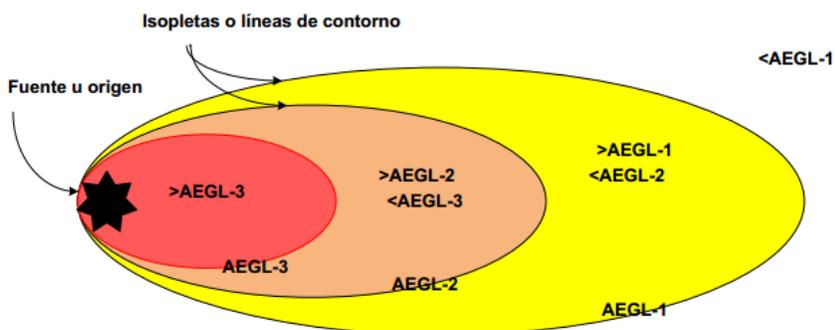
La norma primaria de calidad del aire puede establecer niveles que originan situaciones de emergencias. Estos niveles permiten realizar una gestión del riesgo, frente a situaciones de alta contaminación, causadas por accidentes químicos e influenciados por situaciones meteorológicas específicas.

La norma actual considera niveles de emergencia que no facilitan la gestión de las situaciones de alta contaminación, dado que el primer nivel de 1962 µg/m<sup>3</sup> rara vez ocurre como inmisión en las áreas pobladas.

Para la fijación de estos estándares, hemos considerado pertinente el uso de los AEGLs propuestos por la National Research Council (NRC Estados Unidos), ya que es una metodología relevante, sólida y aplicable para su uso en casos de emisiones aéreas en la población chilena.

Esta referencia considera un AEGL-1 de 520 µg/m<sup>3</sup>, un AEGL-2 de 1950 µg/m<sup>3</sup> y un AEGL-3 de 78000 µg/m<sup>3</sup>. La Figura siguiente expone estos niveles:

NIVELES GUÍA DE EXPOSICIÓN AGUDA Y SIGNIFICADO



	<p><b>&gt;AEGL3</b> : Posible fatalidades y/o efectos severos en la salud  <b>ACCIONES:</b> Minimizar extensión de la exposición/impacto posible – buscar refugio inmediato y asistencia médica para todas las personas afectadas</p>
	<p><b>&gt;AEGL2 → &lt;AEGL3</b>: Aumento de probabilidad de efectos severos en la salud. Deterioro de la habilidad para escapar.  <b>ACCIONES:</b> Evacuación y/o buscar refugio inmediato; posible atención médica para personas susceptibles</p>
	<p><b>&gt;AEGL1 → &lt;AEGL2</b>: Aumento de probabilidad de efectos no permanentes, molestias e irritación moderadas.  <b>ACCIONES:</b> Acciones de protección que comienzan en AEGL2</p>
	<p><b>&lt;AEGL1</b> : No hay impacto adverso en la salud (posible olor e incomodidad).  <b>ACCIONES:</b> Notificación general a AEGL1, evitar movimiento hacia el peligro.</p>

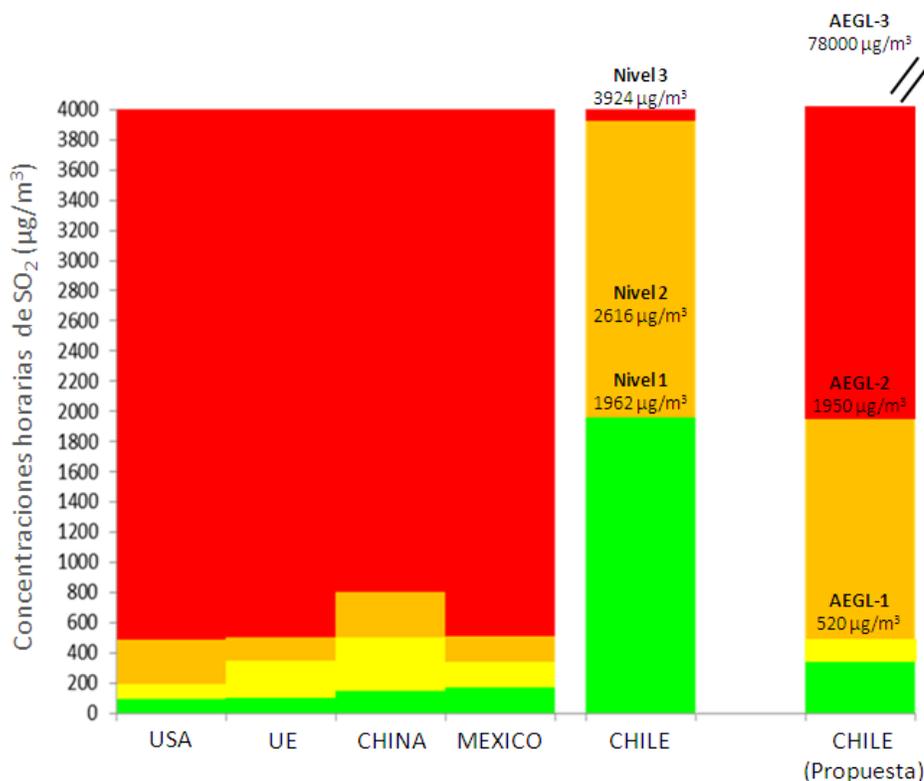
Figura 229. Niveles de Exposición aguda y significado (AEGL-1, AEGL-2, AEGL-3)

#### 6.4.1. Resumen de propuestas niveles de emergencia SO<sub>2</sub>

Se observó que en las zonas estudiadas no se superó en ninguna ocasión el AEGL-3. Mientras que el AEGL-2 se superó en 5 localidades (Antofagasta estación Sur, Copiapó estación Paipote y Tierra Amarilla, Catemu estación Santa Margarita, Puchuncaví estación Los Maitenes y GNL Quintero y Coya estación Coya Club). El AEGL-1 se supera en forma frecuente en la gran mayoría de las localidades, a excepción de Mejillones (solo en 1 oportunidad) y Huasco estación SM3 (solo en 3 oportunidades).

Para cada uno de estos niveles la gestión del riesgo, tal como lo recomienda el NRC, su implementación es de responsabilidad de la autoridad a cargo de la Gestión de Episodios Críticos del respectivo Plan de Descontaminación.

La figura siguiente muestra los niveles de emergencia en USA, UE, China, México y Chile, y una propuesta de nuevos niveles para Chile.



**Figura 230. Niveles de Emergencia**

Fuente: MMA. Al diagrama original se agregó propuesta para Chile

Como se ha planteado, los niveles de emergencia corresponden a niveles de alerta que permiten graduar la intensidad de la respuesta frente a ella. Se propone ajustar los niveles actualmente vigente, básicamente porque el nivel 1 actual, tomando en cuenta los efectos tóxicos del contaminante, resulta ser muy permisivo (a esos niveles se puede constatar daño).

Se propone por lo tanto, rebajarlo a un nivel de prevención de dichos efectos, que pudiera implicar por ejemplo avisar a la población para que no se exponga. El nivel uno actual pasaría a ser nivel 2, que implica según se den condiciones reales de exposición, solicitar a la población permanecer dentro de ambientes cerrados. El nivel 3, es más bien teórico, y no requeriría de mayores actuaciones pues la curva toxicológica estaría mostrando que a esos niveles no existe mayor incremento de los efectos que en el nivel inmediatamente inferior.

## 6.5. Recomendaciones

El estudio está limitado al conocimiento presente de los valores recogidos de calidad de aire en las zonas seleccionadas en Chile y no contempla proyecciones de crecimiento de las emisiones que pudieran darse en un futuro.

Respecto de la exposición aguda al dióxido de azufre, se formulan las siguientes recomendaciones:

a) Sobre la Red de estaciones de medición de calidad del aire

El estudio fue llevado a cabo gracias a la existencia de la red de monitoreo de calidad de aire existentes a lo largo del país. Se sugieren las siguientes mejoras:

- Instalar nuevas estaciones adicionales a las existentes, deseablemente operadas por entidades públicas y de alta tecnología. La cantidad y ubicación de dichas estaciones deberá estudiarse en función de la factibilidad técnica y logística de su instalación, pero como recomendación inicial, se propone al menos instalar nuevas estaciones en aquellos sectores geográficos donde se ha detectado altas concentraciones y frecuencia en *peaks* de SO<sub>2</sub>.
- Realizar auditorías externas documentadas a las estaciones de monitoreo verificando sus calibraciones y operación, con el objetivo fundamental de asegurar lecturas completas, correctas y oportunas.
- Homologar la forma de medir, formatos de entrega de información y unidades de medición a nivel nacional.
- Incorporar variables georreferenciadas en la red de estaciones.

b) Respecto de las emisiones de SO<sub>2</sub> de altas concentraciones, corta duración, y enjambre

En las 14 zonas seleccionadas para el estudio se han producido históricamente eventos de altas concentraciones, de corta duración, y en enjambre, provenientes de la actividad industrial y con fuerte asociación con las condiciones meteorológicas, las que típicamente cambian bruscamente en cada zona. En estas condiciones, se recomienda mejorar la calidad y cantidad de la información meteorológica, y avanzar en la modelación de estos eventos para utilizar esta herramienta con carácter predictivo y anticipativo. Esto permite mejorar la gestión de estos eventos, con relación a la operación de las empresas industriales coordinada por las condiciones meteorológicas y con la supervisión de la autoridad competente. Este sistema supone una cooperación público-privada, con avance tecnológico que conduzca al mejoramiento de la calidad promedio del aire en los alrededores de los puntos de emisión.

c) Respeto de la Normativa

La existencia de normativa de calidad primaria y secundaria para SO<sub>2</sub>, ha permitido generar una cantidad importante de mediciones. Sin embargo, al presente se recomienda avanzar en la implementación de la normativa existente, especialmente en los aspectos relacionados con la frecuencia de obtención de los valores y su evaluación estadística, para detectar tempranamente la presencia de altas concentraciones de este contaminante.

d) Respeto de la capacitación ambiental del personal

Considerando las condiciones de la heterogeneidad de las zonas respecto de los niveles de SO<sub>2</sub>, es posible recomendar la capacitación especializada en este tema, para residentes en la zona, autoridades locales, profesores, dirigentes vecinales, operarios industriales y otros.

e) Respeto del aislamiento de los receptores de la influencia del SO<sub>2</sub>

Es innegable que existen concentraciones de SO<sub>2</sub> que afectan a las comunidades en las cercanías y particularmente bajo viento de los puntos de emisiones seleccionadas, y de otras comunidades no mencionadas en este estudio. Por consiguiente, se propone avanzar en la formulación de alternativas tecnológicas que mejoren la identificación de las viviendas e instalaciones públicas susceptibles tales como colegios, jardines infantiles e instituciones de salud y permitir la instalación de sistemas de aislamiento o “sellado” del interior de dichas instalaciones y que puedan servir como refugios para situaciones de emergencias. Esta solución puede constituir un desafío tecnológico importante considerando los costos involucrados. Por lo que se sugiere contemplar que el Fondo de Innovación contemple el desarrollo de alternativas de construcción equivalentes a lo que se denomina “*the bubble concept*”.

f) Respeto de la exposición ocupacional

La exposición laboral está considerada en forma implícita en el presente estudio. Considerando la alta toxicidad del SO<sub>2</sub>, la protección de la salud del personal que trabaja en las fundiciones, refinerías y operaciones industriales debe ser el primer paso en la prevención de los efectos del SO<sub>2</sub>. Para ello, es recomendable que se revisen, mejoren y/o implementen protocolos dirigidos a proteger a los trabajadores de los efectos del SO<sub>2</sub>.

## 7. SEMINARIO

De acuerdo a las Bases de esta Licitación, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) convocará a un Seminario, a fin de presentar y difundir el presente Estudio.

Se contempla la colaboración como relatores, a Autoridades y Funcionarios del MMA, junto a Autoridades y Equipo Técnico de CENMA que participó en este Estudio.

La Tabla 87 sugiere los términos generales en que se llevaría a cabo esta actividad, cuyo diseño final será acordado en conjunto con la Contraparte Técnica.

**Tabla 87: Propuesta de Formato Seminario**

<b>Nombre de la Actividad</b>	Difusión del Estudio: Análisis de Antecedentes y Evaluación Técnica-Económica para Revisar la Norma Primaria de Calidad del Aire de Dióxido de Azufre SO <sub>2</sub> (MMA y CENMA, 2014)
<b>Audiencia</b>	Orientado a Autoridades, Funcionarios del MMA, Académicos y otros participantes que defina el Mandante
<b>Duración</b>	4 horas
<b>Fecha y Hora</b>	Marzo de 2015 (fecha y horario a convenir con el Mandante)
<b>Lugar de Realización</b>	Centro Nacional del Medio Ambiente (a convenir con el Mandante)
<b>Número de Participantes</b>	A convenir con el Mandante
<b>Objetivo</b>	Dar a conocer los antecedentes, metodología, resultados y conclusiones del Estudio
<b>Contenido</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>I. Introducción</li> <li>II. Objetivos</li> <li>III. Antecedentes Generales</li> <li>IV. Evaluación de la Calidad del Aire y Meteorología asociada a SO<sub>2</sub> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metodología y Resultados de los análisis</li> </ul> </li> <li>V. Efectos del SO<sub>2</sub> en la salud de las personas           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epidemiología</li> </ul> </li> </ol>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicología</li> </ul> <p>VI. Estimación de los Riesgos en la Salud por SO<sub>2</sub></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de Niveles de Referencia para el SO<sub>2</sub></li> </ul> <p>VII. Evaluación de Escenarios Regulatorios</p> <p>Metodología y Resultados de:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de Escenarios Normativos</li> <li>• Evaluación de los Riesgos a la Salud por la Exposición al SO<sub>2</sub></li> <li>• Evaluación Económica y Social</li> </ul> <p>VIII. Discusión y Conclusiones del Estudio</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Integración de Resultados</li> <li>• Propuesta Norma Primaria SO<sub>2</sub> y Niveles de Emergencia</li> </ul> <p>IX. Panel y Discusión de Resultados</p>
<b>Metodología</b>	Ponencias y Discusión
<b>Material de Apoyo</b>	CD y carpeta con apuntes para cada asistente
<b>Apoyo Logístico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coffe break</li> <li>• Cierre de actividad con un Cóctel</li> </ul>



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE



Universidad de Chile

## **Anexo 1: Ubicación geográfica de las estaciones de calidad del aire consideradas en el estudio**

Tocopilla



Figura 231 Estaciones de calidad del aire consideradas en Tocopilla.

## Calama



Figura 232 Estaciones de calidad del aire consideradas en Calama.

## Mejillones



Figura 233 Estaciones de calidad del aire consideradas en Mejillones.

## Antofagasta – La Negra (Antofagasta)



Figura 234 Estaciones de calidad del aire consideradas en Antofagasta.

## Antofagasta – La Negra (La Negra)



Figura 235 Estaciones de calidad del aire consideradas en La Negra.

## Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla



Figura 236 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla.

## Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Copiapó - Paipote)



Figura 237 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Copiapó – Paipote).

Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Tierra Amarilla)



Figura 238 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Tierra Amarilla).

Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Estación Pabellón)



Figura 239 Estaciones de calidad del aire consideradas en Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla (Estación Pabellón).

Huasco



Figura 240 Estaciones de calidad del aire consideradas en Huasco.

## Catemu – Llay Llay

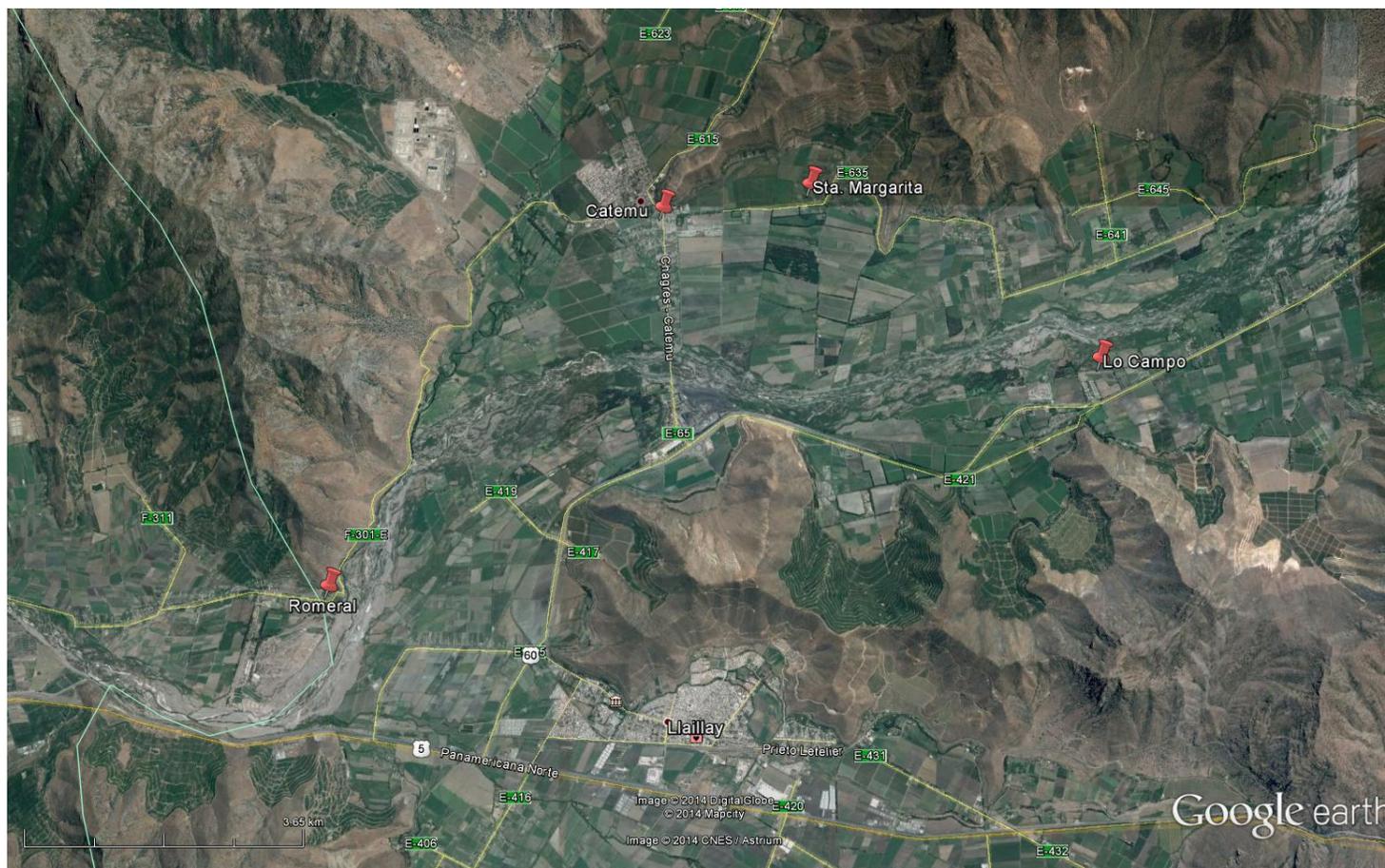


Figura 241 Estaciones de calidad del aire consideradas en Catemu – Llay Llay.

## Quintero - Puchuncaví



Figura 242 Estaciones de calidad del aire consideradas en Quintero – Puchuncaví.

Machalí – Coya



Figura 243 Estaciones de calidad del aire consideradas en Machalí – Coya.

Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano

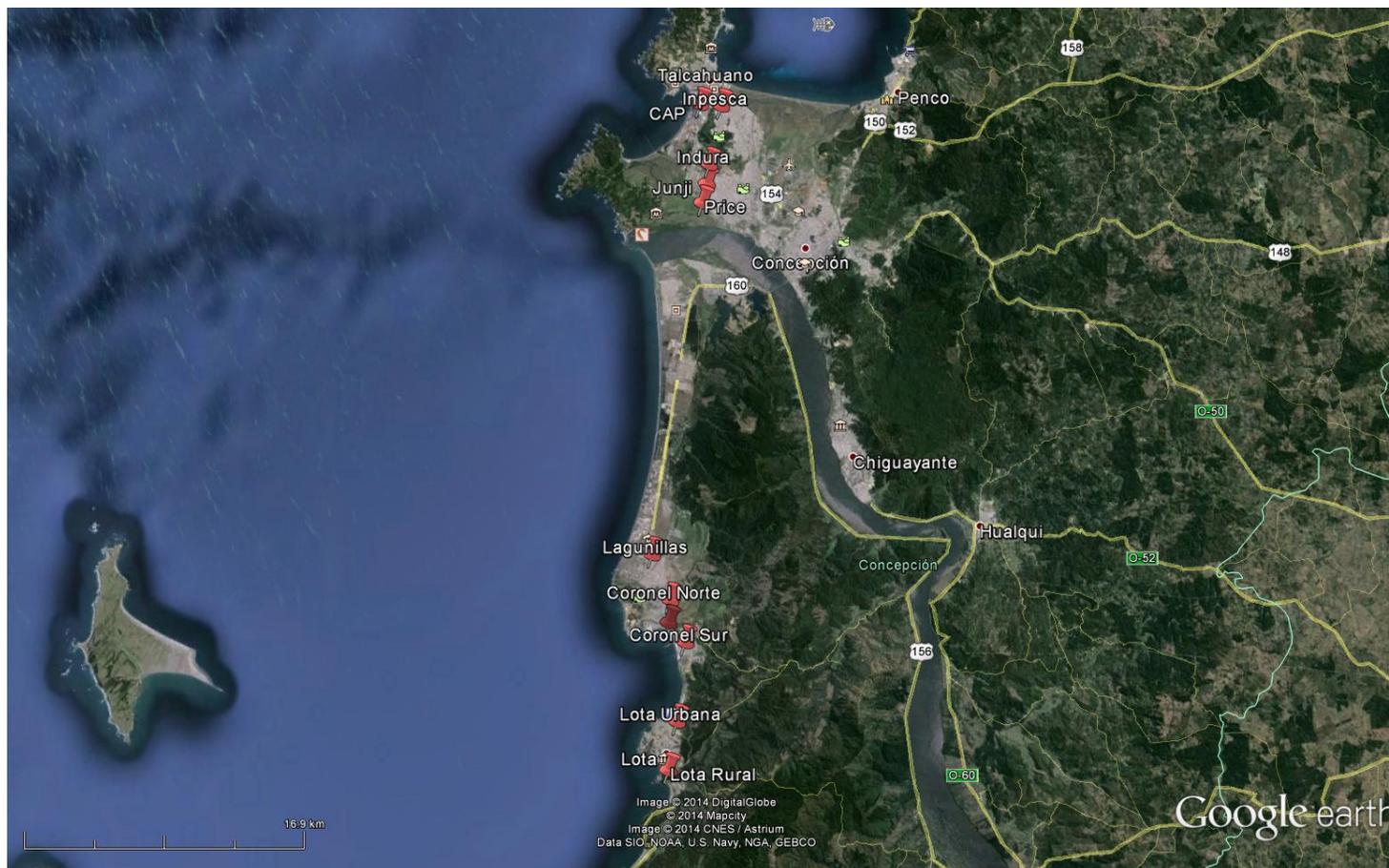


Figura 244 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano.

Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Hualpén – Talcahuano)

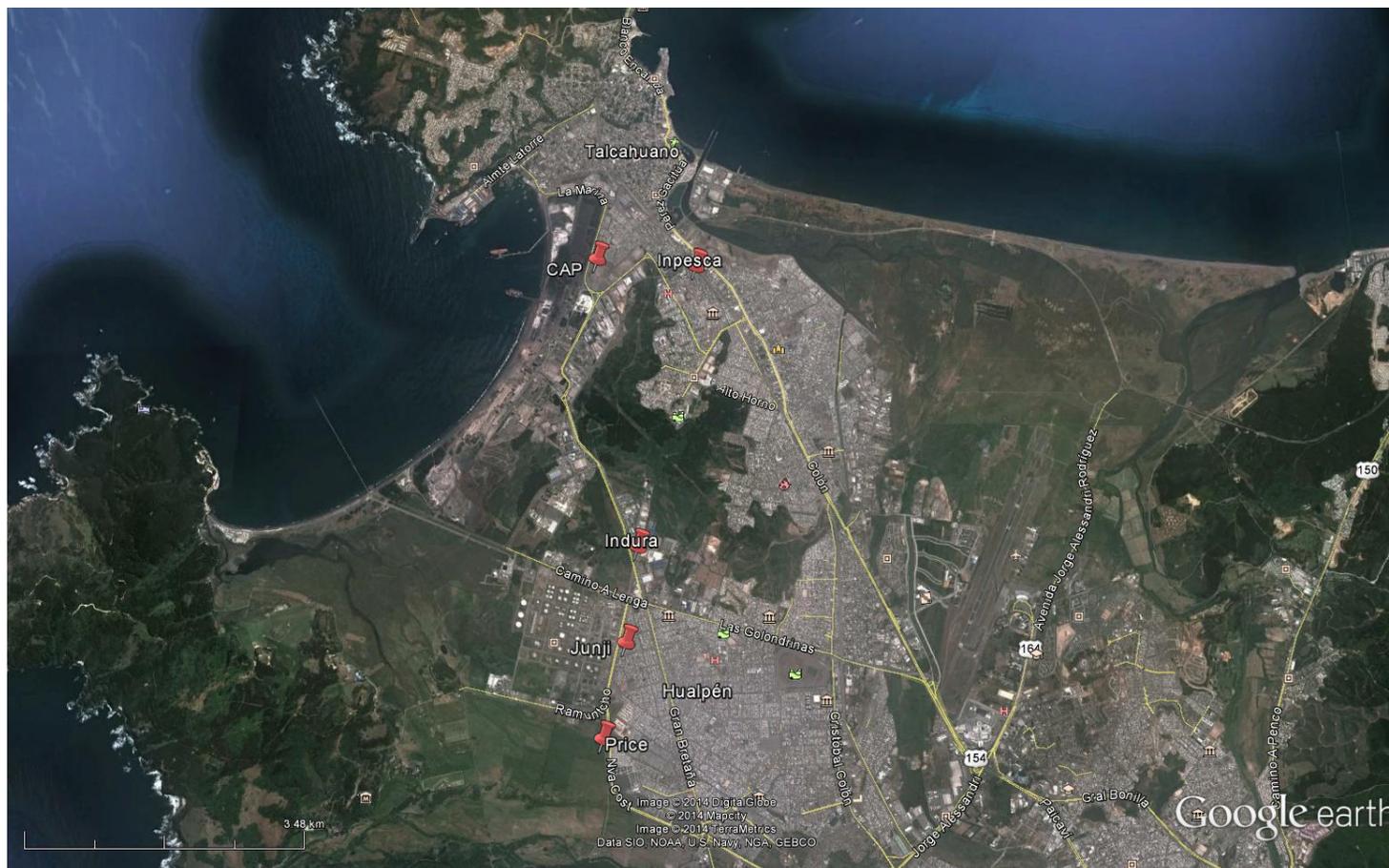


Figura 245 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Hualpén – Talcahuano).

Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Coronel)

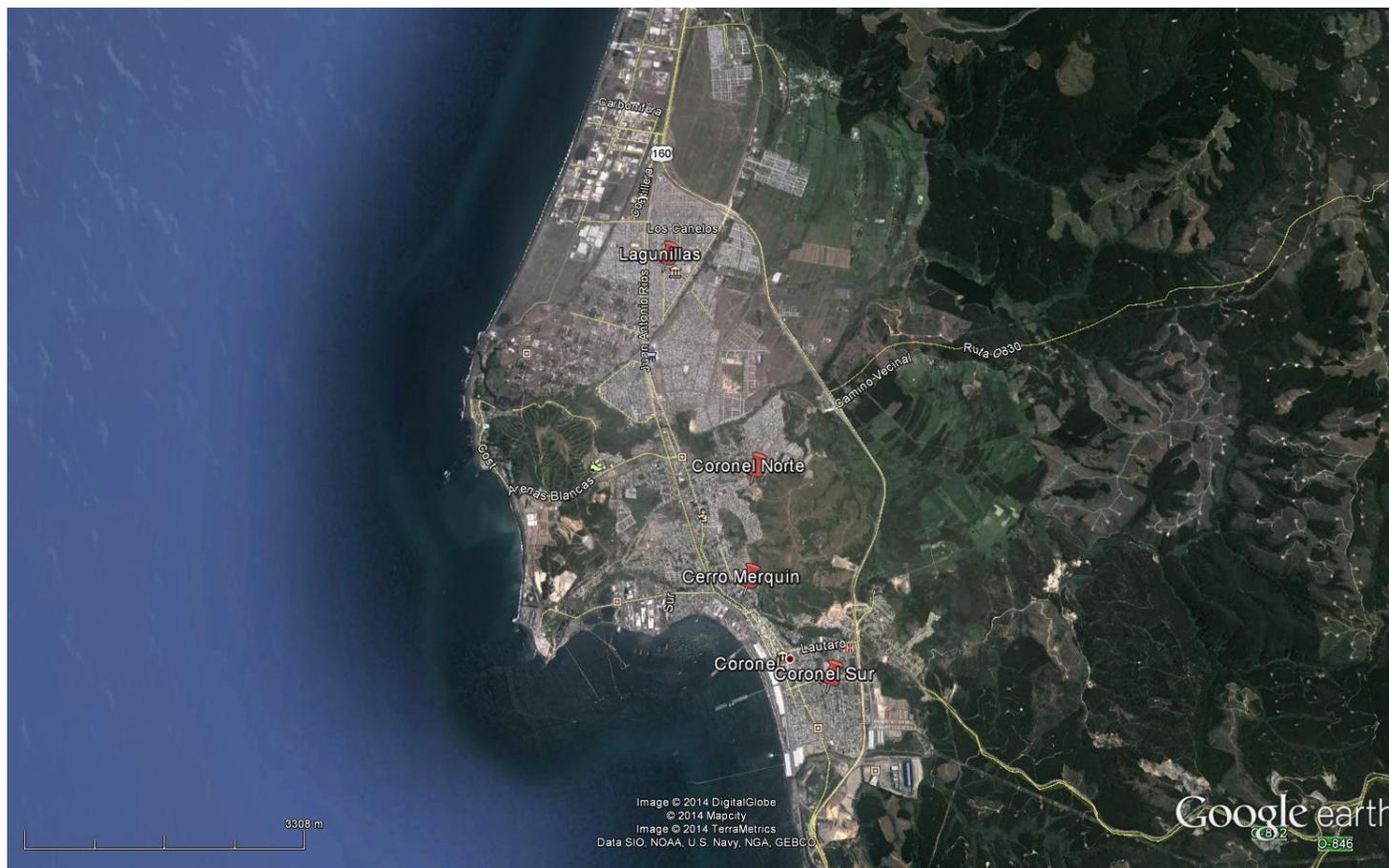


Figura 246 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Coronel).

Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Lota)



Figura 247 Estaciones de calidad del aire consideradas en Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano (Lota).



CENTRO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE



Universidad de Chile

## Anexo 2: Estadística descriptiva

**Zona Tocopilla (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2010	<i>E10</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	<i>Gobernación</i>	8471	12	15	0	5	10	13	347	2	3	6	8	10	11	13	15	21	30	48	70
2011	<i>E10</i>	8309	34	53	0	4	16	42	791	1	3	6	10	16	23	35	52	84	128	196	256
	<i>Gobernación</i>	8272	7	9	0	3	4	9	177	1	2	3	3	4	6	8	10	14	19	31	44
2012	<i>E10</i>	8664	64	99	0	8	29	80	1384	2	6	11	18	29	44	66	100	164	234	375	493
	<i>Gobernación</i>	8711	14	20	1	4	7	13	258	3	4	5	6	7	9	11	17	30	48	80	105
2013	<i>E10</i>	8647	96	132	0	11	46	129	1200	3	7	15	28	46	71	106	159	254	358	507	622
	<i>Gobernación</i>	8617	8	11	2	4	5	8	224	3	3	4	5	5	6	8	10	15	25	41	54

**Zona Calama (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2007	Hospital	8692	1	12	0	0	0	0	786	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	17	33
	SML	7813	3	6	0	0	1	2	169	0	0	0	1	1	1	2	3	6	10	17	26
2008	Hospital	8264	4	14	0	0	1	2	623	0	0	0	0	1	1	2	3	6	13	30	54
	SML	8593	3	12	0	0	0	2	447	0	0	0	0	0	0	1	3	7	11	20	34
2009	Hospital	8626	3	13	0	0	1	2	567	0	0	0	0	1	1	1	2	5	10	26	42
	SML	8515	1	10	0	0	0	0	461	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	15	30
2010	Hospital	8611	3	18	0	0	0	1	915	0	0	0	0	0	0	1	1	4	10	29	49
	SML	8524	2	14	0	0	0	1	717	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	16	32
2011	Hospital	8543	4	10	0	0	1	2	316	0	0	0	1	1	1	2	4	9	13	27	43
	SML	8498	3	9	0	0	1	3	292	0	0	0	0	1	1	2	4	5	11	25	41
2012	Hospital	8668	2	10	0	0	0	1	315	0	0	0	0	0	1	1	1	5	10	23	41
	SML	8647	4	11	0	0	1	3	285	0	0	0	0	1	2	3	4	7	14	30	49
2013	Hospital	8484	5	17	0	0	2	4	850	0	0	0	1	2	3	3	5	10	18	34	56
	SML	8400	6	18	0	1	2	5	681	0	1	1	2	2	3	4	6	12	21	42	71

**Zona Mejillones (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2011	<i>Ferrocarril</i>	8423	5	7	0	1	3	8	107	0	1	1	2	3	4	6	10	14	18	23	29
	<i>JJ Latorre</i>	8595	5	12	0	1	2	6	175	0	0	1	1	2	3	5	7	13	22	39	58
	<i>Sub Eléctrica</i>	8588	7	13	0	1	2	7	228	0	1	1	2	2	4	6	9	17	28	46	65
2012	<i>Ferrocarril</i>	8669	10	11	0	3	9	12	269	1	2	5	7	9	10	12	13	17	22	36	55
	<i>JJ Latorre</i>	8453	7	15	0	1	2	6	261	0	1	1	1	2	3	5	8	15	27	52	77
	<i>Sub Eléctrica</i>	8711	10	22	0	1	3	9	537	1	1	2	2	3	5	7	12	23	39	70	105
2013	<i>Ferrocarril</i>	8602	6	10	0	1	3	7	185	0	1	1	2	3	4	6	8	12	19	34	53
	<i>JJ Latorre</i>	8440	8	15	0	2	3	7	244	1	2	2	3	3	4	6	9	18	31	56	82
	<i>Sub Eléctrica</i>	8692	10	20	0	2	4	10	328	1	1	2	2	4	5	8	13	24	39	71	102

**Zona Antofagasta-La Negra (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2009	Coviefi	8760	3	20	0	0	0	0	973	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	29	57
	Norte	8060	21	416	0	0	0	0	13603	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	31	128
	Sur	8758	136	367	0	1	17	93	8321	0	0	2	7	17	35	63	135	357	713	1332	1831
2010	Coviefi	8499	1	11	0	0	0	0	502	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	16	16
	Norte	8750	1	21	0	0	0	0	1190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9	12
	Sur	8431	181	635	0	0	8	86	6469	0	0	1	4	8	24	54	139	386	808	1836	3429
2011	Coviefi	8753	0	4	0	0	0	0	137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8
	Norte	8753	7	58	0	0	0	0	3238	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	105	234
	Sur	8760	129	279	0	4	32	122	4209	0	0	9	18	32	72	108	159	316	573	1007	1412
2012	Coviefi	8783	1	18	0	0	0	0	990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	11
	Norte	8660	6	92	0	0	0	0	6677	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	31	58
	Sur	8783	39	164	0	0	0	0	2643	0	0	0	0	0	0	0	3	65	212	553	862
2013	Coviefi	8754	10	78	0	0	0	0	813	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	72	402
	Norte	8757	19	91	0	0	0	9	5696	0	0	0	0	0	1	6	16	49	93	172	266
	Sur	8756	82	228	0	0	5	52	3533	0	0	0	2	5	17	34	77	216	438	828	1196

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2009	Coviefi	8760	3	20	0	0	0	0	973	0	0	0	0	0	0	0	0	2	8	29	57
	Norte	8060	21	416	0	0	0	0	13603	0	0	0	0	0	0	0	0	8	16	31	128
	Sur	8758	136	367	0	1	17	93	8321	0	0	2	7	17	35	63	135	357	713	1332	1831
2010	Coviefi	8499	1	11	0	0	0	0	502	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	16	16
	Norte	8750	1	21	0	0	0	0	1190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9	12

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2011	Sur	8431	181	635	0	0	8	86	6469	0	0	1	4	8	24	54	139	386	808	1836	3429
	Coviefi	8753	0	4	0	0	0	0	137	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	8
	Norte	8753	7	58	0	0	0	0	3238	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	105	234
2012	Sur	8760	129	279	0	4	32	122	4209	0	0	9	18	32	72	108	159	316	573	1007	1412
	Coviefi	8783	1	18	0	0	0	0	990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	11
	Norte	8660	6	92	0	0	0	0	6677	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	31	58
2013	Sur	8783	39	164	0	0	0	0	2643	0	0	0	0	0	0	0	3	65	212	553	862
	Coviefi	8566	1	10	0	0	0	0	426	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	9	18
	Norte	8757	19	91	0	0	0	9	5696	0	0	0	0	0	1	6	16	49	93	172	266
	Sur	8756	82	228	0	0	5	52	3533	0	0	0	2	5	17	34	77	216	438	828	1196

**Zona Copiapó-Paipote (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2010	Copiapó	7949	4	27	0	0	1	1	1091	0	0	0	0	1	1	1	1	3	13	32	59
	Los Volcanes	8711	5	19	0	0	2	3	482	0	0	0	1	2	2	2	3	4	15	45	75
	Pabellón	8387	5	12	0	0	2	5	364	0	0	1	1	2	3	4	6	11	18	33	54
	Paipote	7954	32	131	0	0	1	8	3532	0	0	1	1	1	3	6	14	65	162	338	521
	San Fernando	8655	4	26	0	0	1	2	1172	0	0	0	0	1	1	1	3	5	13	26	48
	Tierra Amarilla	8713	11	40	0	0	2	4	992	0	0	1	1	2	2	3	5	17	49	112	186
2011	Copiapó	8673	3	10	0	0	1	2	444	0	0	1	1	1	1	2	2	5	10	23	38
	Los Volcanes	8678	12	34	0	4	5	8	1798	3	4	4	5	5	6	7	9	17	41	88	131
	Pabellón	7799	3	11	0	0	1	3	507	0	0	0	0	1	1	2	4	6	11	27	43
	Paipote	8665	27	112	0	0	0	6	4145	0	0	0	0	0	1	3	15	56	147	299	462
	San Fernando	8660	3	14	0	1	1	1	787	1	1	1	1	1	1	1	1	2	7	22	46
	Tierra Amarilla	8690	17	62	0	2	3	6	2700	1	2	2	2	3	3	5	8	33	82	186	269
2012	Copiapó	8685	4	21	0	0	0	1	585	0	0	0	0	0	0	0	1	3	16	57	89
	Los Volcanes	8705	11	34	0	2	3	5	605	2	2	2	2	3	3	4	6	22	53	105	161
	Pabellón	8579	3	11	0	0	0	1	176	0	0	0	0	0	0	0	2	9	22	36	50
	Paipote	8621	26	114	0	0	0	0	3414	0	0	0	0	0	0	0	2	48	149	327	498
	San Fernando	8657	5	22	0	1	1	1	714	1	1	1	1	1	1	1	2	4	19	50	86
	Tierra Amarilla	8691	18	65	0	2	3	5	1635	1	2	2	2	3	3	4	7	32	88	207	329
2013	Copiapó	8624	10	42	0	0	0	1	882	0	0	0	0	0	0	0	1	18	59	127	206
	Los Volcanes	8687	19	67	0	1	2	4	1504	0	1	1	1	2	2	3	7	44	105	207	317
	Pabellón	8161	15	45	0	1	4	11	706	0	0	2	3	4	6	9	14	29	55	118	195
	Paipote	8699	47	176	0	0	0	0	5598	0	0	0	0	0	0	0	4	117	304	594	859
	San Fernando	8694	9	34	0	2	2	4	869	1	1	2	2	2	3	3	5	15	39	97	158

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
	<i>Tierra Amarilla</i>	8003	27	93	0	1	1	7	2508	0	0	1	1	1	2	5	14	67	163	315	448

**Zona Huasco (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2005	Vertedero	7974	13	32	0	0	3	14	563	0	0	0	1	3	6	10	18	33	56	105	151
	Quinta La Rosa	7976	11	33	0	0	1	6	575	0	0	0	0	1	2	5	9	25	60	120	165
	2 cia Bomberos	7984	17	35	0	1	5	16	479	0	1	2	3	5	8	13	21	41	74	139	181
	Km 40	7980	18	35	0	1	1	27	434	0	1	1	1	1	5	23	28	52	79	137	177
	Parcela 5	7978	18	28	0	4	11	21	495	0	3	6	8	11	15	19	24	36	66	108	143
	Parcela B. Esperanza	7978	13	29	0	0	3	11	469	0	0	0	1	3	5	9	15	35	64	110	144
	Los Loros	7974	23	34	0	1	10	31	551	0	0	3	6	10	17	26	38	60	86	124	155
	Calle Thompsom	7983	9	12	0	5	6	9	287	2	5	6	6	6	7	8	10	16	28	45	59
	Escuela JMC	7976	9	28	0	0	4	6	778	0	0	1	3	4	5	5	8	17	36	87	134
Cuerpo Bomberos	7888	10	30	0	0	2	7	766	0	0	0	1	2	5	6	9	20	40	90	138	
2006	Vertedero	8625	8	21	0	0	1	9	544	0	0	0	0	1	4	7	12	21	32	58	87
	Quinta La Rosa	8719	9	29	0	0	1	3	446	0	0	0	0	1	1	2	6	20	47	97	145
	2 cia Bomberos	8721	14	27	0	1	5	15	387	0	0	1	3	5	9	13	19	32	53	94	135
	Km 40	8713	11	23	0	1	4	7	376	0	1	2	2	4	5	5	18	31	47	81	110
	Parcela 5	8665	15	28	0	0	6	18	353	0	0	1	3	6	10	15	21	32	57	108	146
	Parcela B. Esperanza	8717	9	19	0	0	2	9	266	0	0	0	1	2	5	7	12	23	42	71	95
	Los Loros	8708	26	32	0	1	14	41	299	0	0	2	6	14	22	34	50	73	94	116	134
	Calle Thompsom	8535	7	8	0	3	6	8	171	0	2	4	5	6	6	8	9	12	18	32	44
	Escuela JMC	8712	6	22	0	0	0	4	480	0	0	0	0	0	1	3	6	12	22	48	89
Cuerpo Bomberos	8719	6	27	0	0	0	3	674	0	0	0	0	0	1	2	5	13	25	59	116	

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2007	Vertedero	8726	6	19	0	0	2	5	472	0	0	1	1	2	3	4	6	12	23	46	78
	Quinta La Rosa	8730	8	26	0	0	1	3	480	0	0	0	0	1	1	2	5	16	43	92	140
	2 cia Bomberos	8729	21	34	0	1	9	29	589	0	0	1	4	9	15	24	35	56	79	120	163
	Km 40	8728	10	23	0	2	2	3	729	1	1	2	2	2	3	3	12	29	39	69	98
	Parcela 5	8731	13	21	0	2	7	17	342	0	1	2	4	7	10	15	21	30	45	79	108
	Parcela B. Esperanza	8728	7	18	0	0	1	5	256	0	0	0	0	1	2	4	7	17	33	62	88
	Los Loros	8722	41	55	0	0	19	62	633	0	0	2	9	19	32	50	75	122	159	198	219
	Calle Thompsom	8190	13	11	0	8	13	16	366	3	7	9	12	13	15	16	17	20	27	40	53
	Escuela JMC	8719	5	19	0	0	1	3	347	0	0	0	0	1	1	2	4	9	19	49	91
Cuerpo Bomberos	8689	4	21	0	0	0	1	749	0	0	0	0	0	0	1	2	8	17	48	83	
2008	Vertedero	8756	12	28	0	1	3	9	407	0	0	1	2	3	4	7	13	29	52	99	140
	Quinta La Rosa	8730	12	35	0	0	1	6	433	0	0	0	1	1	2	4	10	32	67	135	184
	2 cia Bomberos	8718	33	45	0	1	15	45	448	0	0	3	8	15	25	37	55	94	123	163	202
	Km 40	8421	17	31	0	1	1	28	457	1	1	1	1	1	5	27	28	43	69	110	148
	Parcela 5	8734	14	32	0	1	3	11	490	0	0	1	2	3	5	8	15	39	71	124	159
	Parcela B. Esperanza	8713	13	30	0	0	2	11	542	0	0	0	1	2	4	8	14	35	67	110	145
	Los Loros	8751	33	47	0	0	15	48	455	0	0	1	6	15	25	39	60	94	129	174	209
	Calle Thompsom	8475	14	16	0	6	10	14	379	4	6	7	9	10	12	14	16	25	41	65	85
	Escuela JMC	8703	9	29	0	0	0	5	524	0	0	0	0	0	1	3	8	21	42	88	148
Cuerpo Bomberos	8732	8	29	0	0	0	3	614	0	0	0	0	0	0	2	6	18	38	76	142	

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2009	Vertedero	8682	15	35	0	1	4	12	550	0	1	2	3	4	6	9	17	37	67	122	180
	Quinta La Rosa	8664	13	34	0	0	2	8	1147	0	0	0	1	2	3	6	13	32	64	118	166
	2 cia Bomberos	8634	26	43	0	1	10	31	455	0	0	1	5	10	16	25	40	74	118	160	199
	Km 40	8654	18	35	0	1	1	27	589	1	1	1	1	1	3	19	28	50	77	124	162
	Parcela 5	8657	14	30	0	0	5	14	880	0	0	1	2	5	8	11	18	37	64	106	142
	Parcela B. Esperanza	8654	12	28	0	0	2	13	415	0	0	0	1	2	5	9	16	32	58	100	136
	Los Loros	8380	16	29	0	1	6	18	679	0	1	2	4	6	9	14	23	42	67	107	138
	Calle Thompsom	8585	17	35	0	4	9	17	1410	1	3	5	6	9	11	14	21	38	62	115	158
	Escuela JMC	8688	13	37	0	0	1	11	680	0	0	0	0	1	4	8	15	33	61	121	190
Cuerpo Bomberos	8605	13	53	0	0	1	8	1309	0	0	0	0	1	2	5	11	25	52	126	194	
2010	Vertedero	8595	14	27	0	1	6	15	481	0	1	2	4	6	9	12	18	33	56	99	132
	Quinta La Rosa	8657	6	16	0	1	3	5	375	0	0	1	2	3	3	4	5	11	23	51	79
	2 cia Bomberos	8665	14	30	0	1	5	13	421	0	0	1	3	5	8	10	16	33	57	104	146
	Km 40	8669	21	32	0	1	6	28	434	1	1	2	2	6	25	28	28	48	73	117	161
	Parcela 5	8656	21	28	0	4	14	29	419	0	2	6	9	14	20	26	33	44	63	106	137
	Parcela B. Esperanza	8666	19	28	0	6	13	21	452	1	4	7	10	13	15	18	25	41	64	102	141
	Los Loros	8662	19	27	0	5	12	22	464	1	3	6	9	12	15	19	27	46	68	102	130
	Calle Thompsom	8657	13	21	0	3	7	14	371	2	3	4	5	7	8	11	17	32	52	77	104
	Escuela JMC	8650	20	34	0	5	11	21	526	2	4	6	8	11	14	18	24	40	66	117	168
Cuerpo Bomberos	8642	16	30	0	5	9	16	609	2	4	6	8	9	11	14	18	29	48	92	140	

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2011	Vertedero	8383	15	28	0	2	6	15	491	1	2	3	4	6	9	12	19	36	59	99	142
	Quinta La Rosa	8664	7	10	1	4	5	6	277	3	3	4	4	5	5	6	7	10	19	35	49
	2 cia Bomberos	8570	13	25	0	2	6	12	428	1	2	2	4	6	8	10	14	27	48	91	124
	Km 40	8634	12	23	0	2	3	13	362	2	2	2	2	3	3	7	21	29	50	82	110
	Parcela 5	8663	21	26	0	4	14	27	639	2	3	6	10	14	19	24	32	49	66	93	115
	Parcela B. Esperanza	8666	15	21	0	5	11	17	537	2	4	7	9	11	13	15	19	31	49	76	102
	Los Loros	8672	16	23	1	4	10	18	433	2	4	6	7	10	12	16	21	37	57	87	109
	Calle Thompsom	8648	16	21	0	5	10	19	529	3	5	6	8	10	13	16	23	35	49	76	98
	Escuela JMC	8620	17	28	0	3	10	19	413	2	3	4	7	10	13	17	23	35	52	98	143
Cuerpo Bomberos	8621	17	27	1	6	11	19	777	3	5	7	9	11	13	16	22	30	43	82	126	
2012	Vertedero	4147	18	31	0	3	9	21	592	2	2	4	6	9	12	17	26	39	62	105	153
	Quinta La Rosa	4142	9	15	1	3	5	8	207	2	3	4	4	5	6	7	9	15	25	56	85
	2 cia Bomberos	4142	16	32	1	2	7	14	465	1	1	3	4	7	9	12	18	38	68	127	170
	Km 40	4082	17	33	0	2	2	24	461	2	2	2	2	2	3	16	27	44	76	125	166
	Parcela 5	4123	27	30	2	3	17	42	372	3	3	4	9	17	25	35	49	70	84	104	134
	Parcela B. Esperanza	4133	19	26	1	6	12	19	342	2	4	7	9	12	14	17	23	40	66	104	138
	Los Loros	4133	18	26	1	3	8	20	382	2	2	3	6	8	12	16	25	45	68	102	124
	Calle Thompsom	4075	17	22	0	6	9	18	444	5	6	7	8	9	12	15	22	38	56	86	107
	Escuela JMC	4127	19	38	1	3	9	17	593	2	2	4	6	9	11	15	21	39	69	147	199
Cuerpo Bomberos	4103	17	34	1	3	9	17	651	2	3	4	6	9	11	15	20	35	59	127	192	

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2013	<i>Vertedero</i>	8607	10	21	0	2	4	9	655	1	1	2	3	4	6	8	12	20	34	62	95
	<i>Quinta La Rosa</i>	8594	11	16	0	6	7	10	347	4	5	6	6	7	8	9	12	19	31	57	81
	<i>2 cia Bomberos</i>	8605	17	32	0	3	7	17	763	2	3	4	5	7	10	14	21	41	70	118	161
	<i>Km 40</i>	8526	18	31	0	2	3	27	678	2	2	2	2	3	10	24	27	45	70	115	147
	<i>Parcela 5</i>	8589	17	29	2	3	8	17	538	3	3	4	6	8	11	14	21	40	67	104	130
	<i>Parcela B. Esperanza</i>	8610	15	25	0	3	7	15	471	2	2	3	5	7	9	13	19	35	57	92	126
	<i>Los Loros</i>	8612	19	27	1	4	10	21	488	2	3	5	7	10	13	18	27	47	70	104	131
	<i>Calle Thompsom</i>	8564	16	24	0	5	8	17	352	3	4	5	6	8	10	14	21	39	59	90	119
	<i>Escuela JMC</i>	8602	19	34	0	4	10	21	563	2	3	5	8	10	13	18	25	41	67	119	163
	<i>Cuerpo Bomberos</i>	8578	16	32	1	3	8	15	776	3	3	4	6	8	11	13	18	31	52	101	155

**Zona Catemu-Llay Llay (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2009	Catemu	8586	18	23	0	9	13	19	836	7	8	9	11	13	14	17	22	33	48	79	106
	Lo Campo	8443	28	41	0	8	14	29	488	5	7	9	11	14	17	24	37	68	106	171	217
	Santa Margarita	8486	63	84	1	9	23	83	898	5	8	11	16	23	37	62	110	186	248	318	370
	Romeral	8598	18	26	1	7	11	20	863	5	6	8	10	11	14	17	23	34	49	79	110
2010	Catemu	8463	14	19	0	5	8	15	389	4	5	6	7	8	10	13	17	26	39	68	96
	Lo Campo	8344	24	45	0	6	11	22	1155	3	5	7	9	11	14	18	28	57	98	163	213
	Santa Margarita	8378	68	93	0	9	22	96	989	5	8	11	15	22	38	70	125	204	272	351	408
	Romeral	8524	15	25	0	5	9	15	785	3	5	6	7	9	11	14	18	28	47	82	120
2011	Catemu	8584	17	21	0	8	12	18	442	5	7	9	10	12	14	16	21	32	49	80	109
	Lo Campo	8480	31	48	0	9	15	30	615	5	8	10	12	15	19	25	39	72	120	181	245
	Santa Margarita	8520	73	97	0	11	26	101	1298	6	9	13	18	26	43	76	129	214	277	367	425
	Romeral	8601	17	23	0	8	12	18	814	5	7	9	10	12	14	16	20	31	49	84	115
2012	Catemu	8556	14	22	0	5	10	16	998	3	5	6	8	10	11	14	18	27	41	64	87
	Lo Campo	8483	33	43	0	12	18	35	576	7	11	13	15	18	22	30	41	71	110	172	224
	Santa Margarita	8532	61	85	0	9	21	80	915	5	8	11	15	21	35	60	107	180	241	317	375
	Romeral	8582	14	22	0	5	9	14	420	2	4	6	8	9	11	13	16	26	45	77	112
2013	Catemu	8607	13	19	0	5	7	13	360	3	4	5	6	7	9	11	15	25	38	68	89
	Lo Campo	8611	33	51	-1	8	14	34	731	5	7	8	11	14	19	27	43	83	128	198	246
	Santa Margarita	8590	69	89	0	12	27	95	865	7	10	14	19	27	44	75	120	200	266	339	395
	Romeral	8560	16	26	0	5	8	15	453	3	4	5	7	8	10	13	18	31	57	97	130

**Zona Quintero-Puchuncaví (en µg/m3N)**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2005	La Greda	6057	16	38	0	4	9	13	864	1	3	6	7	9	11	12	15	30	56	112	164
	Los Maitenes	6072	35	82	0	4	7	21	1713	1	3	4	5	7	13	15	32	94	180	308	406
	Puchuncaví	6076	16	28	0	4	6	14	388	3	4	5	6	6	7	12	15	38	67	113	151
	Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sur	6072	30	69	0	5	11	27	2983	3	5	6	8	11	14	20	36	74	127	212	297
	Valle Alegre	6052	13	26	0	1	5	13	414	0	1	2	4	5	8	12	13	29	52	91	129
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2006	La Greda	6143	27	60	0	6	14	24	1533	0	4	8	11	14	14	19	28	54	96	187	276
	Los Maitenes	6134	49	109	0	9	13	31	1773	3	5	11	12	13	17	24	45	130	250	423	547
	Puchuncaví	6145	26	44	4	7	10	18	572	5	6	8	9	10	11	14	26	70	117	176	224
	Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sur	6109	46	81	0	10	16	44	1311	6	9	11	13	16	21	33	57	118	195	310	399
	Valle Alegre	6124	19	34	0	6	8	13	418	4	6	7	7	8	10	12	18	41	78	138	179
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2007	La Greda	6513	26	60	1	7	13	21	1341	3	5	9	11	13	13	17	26	49	94	181	284
	Los Maitenes	6503	56	123	0	11	14	33	1597	9	10	11	13	14	17	26	46	146	277	487	628
	Puchuncaví	6521	29	48	2	10	11	20	526	8	9	10	10	11	12	16	29	78	132	200	240
	Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sur	6475	38	83	0	4	8	29	1204	2	3	5	6	8	12	21	44	102	186	312	428
	Valle Alegre	6522	25	32	5	13	17	21	375	10	12	14	16	17	19	20	24	44	79	133	184
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2008	La Greda	6270	32	79	0	4	10	27	2144	2	3	4	5	10	14	21	38	71	133	256	388
	Los Maitenes	6222	63	132	0	12	16	42	1589	4	9	13	13	16	23	31	62	164	316	533	710
	Puchuncaví	6278	31	55	2	7	10	24	632	6	7	7	8	10	12	18	36	89	141	210	270
	Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Sur	6260	47	105	0	3	14	40	1860	1	2	5	9	14	21	32	54	116	209	366	498
	Valle Alegre	6269	25	46	2	8	11	18	680	6	8	9	10	11	12	15	24	53	98	182	247
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2009	La Greda	6503	35	65	1	9	18	37	2861	4	8	10	14	18	24	31	46	78	122	199	271
	Los Maitenes	6508	56	117	0	7	13	39	1277	5	6	8	13	13	18	29	58	159	293	454	589
	Puchuncaví	6524	25	42	1	7	9	20	506	4	6	7	8	9	11	16	30	68	111	169	201
	Quintero	242	11	21	2	5	5	12	267	4	5	5	5	5	5	9	13	23	37	62	74
	Sur	6514	44	65	0	15	26	45	1272	8	12	17	21	26	32	39	55	91	142	247	330
	Valle Alegre	6509	27	107	0	6	13	22	4367	3	5	7	11	13	17	20	25	52	90	150	194
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2010	La Greda	6375	14	114	0	2	4	6	7580	1	2	2	3	4	5	5	6	11	26	90	309
	Los Maitenes	6326	43	96	0	12	16	27	2395	7	12	13	14	16	18	23	36	94	189	331	449
	Puchuncaví	6386	22	85	0	6	12	23	6409	5	6	7	9	12	15	20	25	47	74	105	136
	Quintero	6385	18	43	0	5	6	13	1348	4	5	5	6	6	9	12	17	34	66	116	189
	Sur	6286	67	647	0	8	12	28	13228	6	7	8	9	12	16	22	36	77	150	310	449
	Valle Alegre	6270	8	18	0	4	4	7	532	1	3	4	4	4	5	6	8	15	26	48	75
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	7896	111	363	0	5	12	55	10200	1	4	6	9	12	17	36	90	289	558	1055	1475

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99	
2011	La Greda	6458	12	30	0	2	3	8	537	1	2	2	3	3	4	6	11	26	54	109	155	
	Los Maitenes	6452	36	78	2	6	9	25	1362	4	6	7	8	9	13	19	34	96	175	282	392	
	Puchuncaví	6469	18	26	4	5	8	15	367	5	5	6	7	8	9	12	20	45	72	104	132	
	Quintero	6500	26	83	0	8	13	21	1765	4	7	9	11	13	16	19	22	41	73	140	267	
	Sur	6428	34	66	4	10	14	27	1617	8	10	11	13	14	17	23	34	73	136	240	330	
	Valle Alegre	6473	12	20	3	5	7	10	345	4	5	5	6	7	8	9	13	23	40	76	102	
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	8283	132	372	0	6	14	71	9109	3	5	7	10	14	25	49	110	344	705	1274	1799	
2012	La Greda	7611	16	38	0	5	7	11	1037	4	4	5	6	7	8	9	14	28	55	108	182	
	Los Maitenes	7612	31	61	1	7	12	21	836	5	7	8	10	12	14	18	26	77	142	245	324	
	Puchuncaví	7641	17	25	4	8	9	13	840	7	8	8	9	9	10	12	16	37	65	98	123	
	Quintero	7577	30	79	0	5	10	21	1650	0	4	6	8	10	13	18	24	59	122	243	386	
	Sur	7563	27	50	1	5	12	24	917	2	4	6	10	12	15	20	31	63	114	192	258	
	Valle Alegre	7610	12	16	3	7	8	9	248	4	5	7	8	8	8	9	11	20	35	63	86	
	Ventanas	0	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	GNL Quintero	8415	74	206	0	7	13	37	3665	4	7	8	10	13	17	26	55	173	388	721	988	
2013	La Greda	8568	23	50	1	6	9	16	900	5	6	7	7	9	10	14	21	46	89	170	242	
	Los Maitenes	8627	33	69	0	7	13	23	1079	3	6	8	10	13	15	20	30	82	156	256	355	
	Puchuncaví	8638	25	29	3	10	13	23	389	9	10	11	12	13	16	20	28	56	85	124	150	
	Quintero	8641	26	78	0	4	6	14	2004	2	3	4	5	6	8	11	19	51	114	261	388	
	Sur	8638	25	29	3	10	13	23	389	9	10	11	12	13	16	20	28	56	85	124	150	
	Valle Alegre	8641	26	78	0	4	6	14	2004	2	3	4	5	6	8	11	19	51	114	261	388	
	Ventanas	8628	22	47	0	3	7	19	779	1	2	4	6	7	10	15	24	52	97	178	234	
	GNL Quintero	8509	37	74	0	11	15	26	1216	9	10	12	14	15	18	22	33	73	144	286	388	

**Zona Machalí-Coya (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2005	Coya Club	8675	34	103	0	0	0	14	1446	0	0	0	0	0	1	7	27	91	193	366	549
	Coya Población	8695	8	29	0	0	0	3	470	0	0	0	0	0	0	2	5	15	42	103	158
	Cauquenes	8527	8	19	0	0	2	7	279	0	0	0	1	2	4	6	10	22	38	67	100
	Cipreses	8680	7	19	0	0	1	5	471	0	0	0	0	1	2	4	7	16	31	59	97
2006	Coya Club	8654	62	155	0	0	5	40	1827	0	0	0	2	5	9	24	63	179	356	580	812
	Coya Población	8650	14	43	0	0	2	6	871	0	0	0	1	2	2	4	10	37	70	137	209
	Cauquenes	8626	14	30	0	1	5	12	394	0	0	1	2	5	7	10	16	33	60	115	158
	Cipreses	8620	11	28	0	0	2	10	697	0	0	0	1	2	5	8	14	28	48	84	132
2007	Coya Club	8688	57	149	0	0	3	31	1603	0	0	0	2	3	6	18	53	167	343	595	768
	Coya Población	8563	14	44	0	0	2	7	931	0	0	0	1	2	3	5	10	34	75	140	212
	Cauquenes	8491	11	32	0	0	0	6	608	0	0	0	0	0	2	4	10	29	60	116	161
	Cipreses	8480	8	25	0	0	1	4	607	0	0	0	0	1	2	3	6	19	44	84	120
2008	Coya Club	8651	35	102	1	2	2	14	1428	2	2	2	2	2	3	9	25	91	200	397	545
	Coya Población	8672	10	29	1	1	1	4	513	1	1	1	1	1	1	2	7	23	48	97	141
	Cauquenes	8690	4	17	0	0	0	2	371	0	0	0	0	0	0	1	3	8	20	46	79
	Cipreses	8626	6	20	0	0	0	3	394	0	0	0	0	0	0	2	4	13	30	64	94
2009	Coya Club	8638	57	131	1	2	5	41	1900	2	2	2	2	5	11	26	64	179	314	504	651
	Coya Población	8508	16	36	0	1	3	15	585	1	1	1	1	3	7	12	19	41	69	129	180
	Cauquenes	8634	10	26	0	0	0	6	503	0	0	0	0	0	2	4	9	29	59	101	131
	Cipreses	8410	7	23	0	0	0	3	598	0	0	0	0	0	0	2	5	16	36	75	112
2010	Coya Club	8488	53	127	2	2	2	36	1375	2	2	2	2	2	7	21	57	168	322	490	627
	Coya Población	8248	13	38	0	1	2	7	730	0	1	1	1	2	3	5	11	32	65	118	187
	Cauquenes	8485	12	36	0	1	4	9	702	0	1	1	2	4	5	6	12	25	49	100	158
	Cipreses	8649	7	26	0	0	0	2	910	0	0	0	0	0	0	1	4	17	37	75	114

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2011	<i>Coya Club</i>	8677	33	83	1	2	2	17	868	2	2	2	2	2	3	10	29	96	202	341	431
	<i>Coya Población</i>	8589	10	27	0	1	3	6	526	0	1	1	2	3	3	5	9	22	43	84	126
	<i>Cauquenes</i>	8484	8	18	0	1	3	6	491	0	0	1	2	3	4	5	9	16	33	64	87
	<i>Cipreses</i>	8386	4	14	0	0	0	2	496	0	0	0	0	0	1	1	2	6	16	37	63
2012	<i>Coya Club</i>	8664	30	74	1	2	2	15	735	2	2	2	2	2	2	8	28	93	184	295	381
	<i>Coya Población</i>	8593	7	19	0	1	2	5	293	0	1	1	1	2	3	4	7	16	33	62	103
	<i>Cauquenes</i>	8619	7	17	0	1	3	6	285	0	0	1	2	3	4	5	8	17	33	64	92
	<i>Cipreses</i>	8641	5	21	0	0	0	2	871	0	0	0	0	0	1	1	3	12	31	58	76
2013	<i>Coya Club</i>	8492	25	62	0	0	2	14	782	0	0	1	2	2	3	8	24	76	145	243	322
	<i>Coya Población</i>	8512	5	15	0	0	1	3	327	0	0	0	0	1	2	3	5	12	25	50	70
	<i>Cauquenes</i>	8639	6	14	0	0	1	5	347	0	0	0	1	1	2	4	7	14	26	47	66
	<i>Cipreses</i>	8350	4	13	0	0	0	3	392	0	0	0	0	0	1	2	4	9	18	37	55

**Zona Coronel-Talcahuano-Lota-Hualpén (en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ )**

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99			
2005	Junji	6506	38	59	0	9	15	37	624	6	8	10	12	15	20	29	49	101	159	234	290			
	Inpesca	8399	16	27	0	4	7	16	361	3	3	5	5	7	9	13	20	39	65	112	145			
	Indura	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	PRICE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	CAP	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--		
	C Sur	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	C Norte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	Lagunillas	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cerro Merquin	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Urbana	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Rural	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2006	Junji	6689	39	57	0	9	16	41	471	6	8	10	13	16	21	32	53	106	168	239	271			
	Inpesca	8021	19	31	0	5	9	20	605	3	4	5	7	9	12	17	25	44	68	116	161			
	Indura	1041	46	60	0	7	19	64	434	5	5	8	11	19	32	52	81	126	163	222	277			
	PRICE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	CAP	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	C Sur	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
	C Norte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Lagunillas	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cerro Merquin	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Urbana	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Rural	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99	
2007	Junji	7012	43	69	0	8	15	42	795	5	7	9	12	15	21	32	57	131	193	272	330	
	Inpesca	8138	16	25	0	5	8	16	379	3	5	5	7	8	10	13	19	37	60	97	123	
	Indura	8593	23	35	0	6	11	25	616	4	5	7	9	11	14	20	31	57	88	135	170	
	PRICE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	CAP	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	C Sur	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	C Norte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Lagunillas	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cerro Merquin	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Urbana	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Rural	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2008	Junji	8178	38	68	0	4	11	36	705	2	3	5	8	11	17	28	48	105	189	281	342	
	Inpesca	8547	26	32	0	10	14	28	498	6	9	10	12	14	17	23	34	60	89	133	162	
	Indura	8597	24	31	0	8	14	28	542	4	8	9	11	14	17	23	35	58	83	117	148	
	PRICE	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	CAP	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	C Sur	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	C Norte	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Lagunillas	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Cerro Merquin	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Urbana	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	Rural	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2009	<i>Junji</i>	8536	32	53	1	5	11	32	896	3	4	6	8	11	16	25	43	92	143	203	246
	<i>Inpesca</i>	8498	18	27	0	4	8	21	569	2	3	5	6	8	12	17	27	47	69	101	129
	<i>Indura</i>	8685	19	25	0	4	7	22	227	3	3	4	5	7	11	17	29	53	73	96	116
	<i>PRICE</i>	8728	11	29	0	2	4	9	612	1	2	3	3	4	5	7	11	21	35	77	144
	<i>CAP</i>	8731	19	30	0	5	8	20	293	2	4	5	7	8	12	16	25	50	81	119	148
	<i>C Sur</i>	7995	8	17	0	1	3	8	384	0	1	1	2	3	4	6	10	21	36	60	83
	<i>C Norte</i>	8437	13	29	0	1	3	10	431	0	1	2	2	3	5	8	14	33	65	114	155
	<i>Lagunillas</i>	8129	6	15	0	1	2	5	269	1	1	1	2	2	3	4	7	14	26	49	75
	<i>Cerro Merquin</i>	8447	6	15	0	1	2	4	446	1	1	1	2	2	2	3	5	10	22	53	59
	<i>Urbana</i>	8578	10	15	0	2	5	11	231	1	1	2	3	5	7	9	14	25	37	56	70
<i>Rural</i>	8587	8	21	0	1	3	7	612	1	1	1	2	3	4	6	9	17	30	52	84	
2010	<i>Junji</i>	7745	15	27	0	3	5	14	549	2	3	3	4	5	7	11	19	41	69	104	134
	<i>Inpesca</i>	7046	8	14	0	1	3	8	248	1	1	2	2	3	4	6	11	22	34	53	71
	<i>Indura</i>	7542	11	15	0	3	4	11	162	2	2	3	4	4	6	9	15	31	44	61	74
	<i>PRICE</i>	7303	6	18	0	1	2	4	599	1	1	1	2	2	3	4	5	10	20	44	75
	<i>CAP</i>	8217	21	34	0	5	8	18	370	3	4	5	6	8	10	14	24	56	91	137	170
	<i>C Sur</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	<i>C Norte</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	<i>Lagunillas</i>	8379	4	11	0	1	1	4	261	0	0	1	1	1	2	3	5	9	15	28	44
	<i>Cerro Merquin</i>	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	<i>Urbana</i>	7718	11	20	0	2	4	12	347	1	1	2	3	4	7	10	15	28	45	75	110
<i>Rural</i>	8212	6	19	0	1	2	5	709	0	0	1	1	2	2	4	6	12	25	54	82	

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99	
2011	Junji	8626	16	24	0	3	7	18	278	2	3	4	5	7	10	14	23	43	65	97	121	
	Inpesca	8643	8	13	0	2	3	9	162	1	2	2	3	3	5	7	11	22	35	53	66	
	Indura	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	PRICE	8371	10	15	0	2	4	11	416	1	2	3	3	4	6	9	14	26	38	55	70	
	CAP	7854	6	13	0	1	2	5	166	1	1	1	2	2	3	4	7	15	26	46	65	
	C Sur	8616	10	19	0	1	3	11	332	0	1	1	2	3	5	8	14	27	45	74	97	
	C Norte	8513	14	35	0	1	3	9	473	0	1	1	2	3	4	6	13	35	68	125	178	
	Lagunillas	8415	7	18	0	1	2	5	320	0	1	1	1	2	3	4	6	14	29	60	93	
	Cerro Merquin	8115	6	9	0	2	4	7	155	1	2	2	3	4	5	6	8	14	21	34	46	
	Urbana	8628	11	17	0	1	4	12	236	1	1	2	3	4	6	10	15	28	43	66	86	
Rural	8497	6	16	0	1	1	4	263	0	0	1	1	1	2	3	6	15	30	58	81		
2012	Junji	8290	16	26	1	3	6	16	254	2	3	3	4	6	8	12	21	43	73	110	133	
	Inpesca	8294	6	12	0	1	2	6	340	0	1	1	2	2	3	5	8	17	28	46	59	
	Indura	8525	9	14	0	2	4	9	150	2	2	2	3	4	5	7	12	23	37	55	71	
	PRICE	8212	7	16	0	1	3	5	254	1	1	2	2	3	3	4	7	15	26	61	92	
	CAP	8629	12	18	0	4	7	12	215	3	4	5	5	7	8	10	14	25	42	71	94	
	C Sur	8537	14	23	0	2	5	16	278	0	1	2	3	5	8	13	20	36	55	90	119	
	C Norte	8546	14	35	0	1	3	9	595	0	1	1	2	3	4	7	12	35	72	126	178	
	Lagunillas	8661	6	16	0	1	2	5	297	0	1	1	1	2	3	4	7	14	27	54	80	
	Cerro Merquin	5806	9	12	0	3	6	10	172	2	3	4	5	6	8	9	11	16	25	43	61	
	Urbana	8607	11	17	0	1	4	13	330	1	1	2	3	4	7	10	16	29	43	64	83	
Rural	8418	9	28	0	1	2	7	729	0	1	1	1	2	3	5	10	22	41	73	125		

Año	Estación	n	Media	Desv. estándar	Mínimo	Cuartil 25%	Cuartil 50%	Cuartil 75%	Máximo	P10	P20	P30	P40	P50	P60	P70	P80	P90	P95	P98	P99
2013	<i>Junji</i>	8332	20	32	0	4	8	21	363	2	3	4	5	8	11	16	28	56	92	128	155
	<i>Inpesca</i>	8236	10	11	0	5	7	11	212	2	5	6	7	7	8	10	13	21	32	46	61
	<i>Indura</i>	8469	9	12	0	2	4	10	192	1	2	3	3	4	5	8	12	22	33	48	60
	<i>PRICE</i>	8279	9	20	0	2	3	6	334	1	2	2	3	3	4	5	8	16	30	79	113
	<i>CAP</i>	8593	12	16	0	4	7	13	219	3	4	5	6	7	9	11	15	26	40	63	83
	<i>C Sur</i>	7995	8	17	0	1	3	8	384	0	1	1	2	3	4	6	10	21	36	60	83
	<i>C Norte</i>	8437	13	29	0	1	3	10	431	0	1	2	2	3	5	8	14	33	65	114	155
	<i>Lagunillas</i>	8129	6	15	0	1	2	5	269	1	1	1	2	2	3	4	7	14	26	49	75
	<i>Cerro Merquin</i>	8447	6	15	0	1	2	4	446	1	1	1	2	2	2	3	5	10	22	53	59
	<i>Urbana</i>	8578	10	15	0	2	5	11	231	1	1	2	3	5	7	9	14	25	37	56	70
<i>Rural</i>	8587	8	21	0	1	3	7	612	1	1	1	2	3	4	6	9	17	30	52	84	

## Anexo 3: Tratamiento de la información

Para este estudio, se recopiló toda la información de concentraciones de SO<sub>2</sub> y meteorológicas que el Ministerio del Medio Ambiente consiguió con las Seremis regionales de las 10 zonas que fueron priorizadas por el mismo Ministerio, más información de la Región Metropolitana. Esta información se recibió en diferentes formatos y resoluciones, por lo que fue necesario estandarizar la data para trabajar en la confección de una base de datos consolidada. Además, no todos los datos se recibieron validados o con códigos de validación, por lo que el proceso de validación de la información fue distinto en cada zona, dependiendo de la información recibida.

El proceso de verificación de la información consiste en una revisión de los datos recibidos. Principalmente se chequea la presencia de códigos de validación que indiquen que los datos están efectivamente validados, de no presentar códigos, la información es nuevamente revisada para corroborar si existen datos faltantes o fuera de rango. De existir datos faltantes o fuera de rango (se entiende como fuera de rango, a datos de concentración sospechosamente elevados o constantes en el tiempo), se compara la información con planillas de calibraciones (solicitadas al Ministerio del Medio Ambiente) y se eliminan los datos de concentraciones que correspondan a calibraciones en terreno. Por lo general, al momento de hacer calibraciones a los equipos de medición, se envía una alta concentración al equipo y luego se hace un chequeo de cero, este comportamiento se busca en los datos para identificarlos como calibraciones. Por otra parte las unidades de SO<sub>2</sub> fueron estandarizadas a µg/m<sup>3</sup>N dado que algunos datos venían en unidades de ppb. La fórmula usada para convertir los datos a la unidad estándar fue la propuesta por la norma.

$$\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N} = (\text{ppmv} \times \text{PM}) / 0,02445$$

donde PM: Peso molecular (SO<sub>2</sub> = 64) y 0,02445 es el volumen de un mol de gas en metros cúbicos a 25°C.

$$1 \text{ ppmv} = 1000 \text{ ppbv}$$

$$1 \text{ mg}/\text{m}^3\text{N} = 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$$

A continuación se describe el proceso de recepción, validación y supuestos tomados en cada una de las zonas priorizadas:

### Zona Tocopilla

Los datos recibidos en esta zona se presentan como validados. La información se recibe en formato .xls (Excel) en µg/m<sup>3</sup>N a una resolución horaria. Los datos faltantes presentan los códigos de validación respectivos (2.a, 2.b, 2.c, etc). Por lo tanto para esta zona se asume que los datos están validados.

### Zona Calama

La información es recibida en archivos .xls (Excel) en ppb en resolución de 5 minutos. Entre los años 2007 y 2014, el año 2010 no presenta códigos de validación en los datos, además se observan peaks de concentraciones superiores a 2000 ppb espaciados aproximadamente cada 10 días, lo que podría indicar calibraciones en terreno. Para el año 2010 se utilizó una tabla de calibraciones para eliminar los datos de concentraciones en horas en que se reportaron calibraciones.

### **Zona Mejillones**

Los datos recibidos en Mejillones presentan códigos de validación en formato .xls (Excel) y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Esta información se trabaja sin cambios.

### **Zona Antofagasta – La Negra**

Los datos fueron recibidos en archivos .xls (Excel) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  y con una resolución temporal de 5 minutos. No se observan códigos de validación en los datos. Se observan valores máximos de concentración que bordean los 18000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , que elevan los promedios horarios hasta un máximo de 13603  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en la estación Norte en el año 2009. Estos valores extremos altos son considerados dudosos, no obstante, no se eliminan de la base de datos, ya que no se contó con una tabla de calibraciones como referencia para eliminar estos datos de la base final. Lo que sí se eliminó, se consideró erróneo, fue la persistencia de valores 800  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en el año 2013 en la estación Coviefi por más de dos días seguidos. También se eliminaron datos negativos presentes en todo el periodo recibido.

### **Zona Copiapó – Paipote – Tierra Amarilla**

Se reciben datos en formato .txt (archivo de texto) en resolución de 5 minutos y en ppm y  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  como unidades. Se trabaja con los datos en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Se encuentran dos anomalías: en la estación Paipote en el año 2010 y en la estación Pabellón en el año 2013 se encuentran datos de minutos en la columna de concentraciones, estos datos inducían a errores de cálculo ya que los programas estadísticos los consideran números (valores elevados), por lo que estos datos son retirados de la base de datos. Por otra parte, los datos recibidos no presenta códigos de validación, pero si se encontraron valores "Samp<", que también fueron removidos de la base de datos. Como no se contó con tablas de calibraciones o similares, los datos fueron trabajados una vez borrados los errores mencionados.

### **Zona Huasco**

Los datos fueron recibidos en planillas .xls (Excel) con resolución de 1 hora y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Los datos presentan valores con los códigos "C", "#" y "+", que según se informa significan: "ausencia de datos por mantención de equipo", "ausencia de datos por calibración de equipo" y "ausencia de datos por corte de suministro de energía". Estos datos son borrados de la base de datos. Desde el año 2009 se presentan en los datos los códigos de validación, por lo que se asumen válidos.

### **Zona Catemu – Llay Llay**

Se reciben datos en formato .xls (Excel) en resolución de 5 minutos y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Los datos si bien no presentan los códigos de validación, presentan el mensaje "No Data". Estos datos se borran de la base de datos final.

### **Zona Quintero – Puchuncaví**

Se reciben datos en archivos .xls en resolución de 1 minuto y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Una anomalía encontrada es la inexistencia de datos para el último día de cada mes, en algunos casos para los últimos dos días del mes. Esto puede deberse a un error en el ordenamiento de la información. Entre 2005 y 2009 los datos presentan periodos vacíos que corresponden a validaciones, n obstante desde el año 2010 esto no ocurre. Se observan datos elevados de concentraciones desde el año 2010, por lo que se solicitan tablas de calibraciones para verificar la veracidad de esta información. Haciendo el cruce de información, es posible borrar estos datos de la base final.

### **Zona Machalí – Coya**

Se reciben datos en formato .xls (Excel) en resolución de 5 minutos y en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Se observan dos anomalías, la primera la existencia de periodos prolongados con el valor  $1,5708 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  en la estación Coya Club y la existencia de valores superiores a  $4000 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ , que sin embargo, no son considerados calibraciones ya que no presentan el comportamiento de tales. Estos datos se mantienen en la base de datos final.

### **Zona Coronel – Lota – Hualpén – Talcahuano**

Para el caso de las estaciones Junji, Indura, Inpesca, Price, Sur, Norte, Lagunillas, Urbana, Rural se recibieron datos en resolución de 1 hora, en formato .xls (Excel) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Se reciben tablas con datos procesados, aparentemente validados. Para el caso de la estación CAP, se reciben datos en resolución de 10 minutos, en archivo .xls (Excel) y en ppb. Estos datos muestran una X, lo que se asume dato borrado por error o calibración. Estos datos X se borran de las bases de datos finales.