

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
SEDE CONCEPCIÓN - REY BALDUINO DE BÉLGICA**

**COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS DE MONITOREO DE CALIDAD  
DEL AIRE CON EL VALOR HORARIO DE DIÓXIDO DE AZUFRE EN LAS  
COMUNAS DE QUINTERO Y PUCHUNCAVÍ**

Trabajo de Titulación para optar al  
Título de Ingeniero de Ejecución en  
GESTIÓN Y CONTROL  
AMBIENTAL

Alumna:

Javiera Paz Galleguillos Carvallo

Profesor Guía:

Ing. Mg. Karen Milena Peña Puentes



## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia, por su apoyo incondicional.*

## RESUMEN

**KEYWORDS:** NORMA DE CALIDAD PRIMARIA, DIÓXIDO DE AZUFRE, CALIDAD DEL AIRE, QUINTERO, PUCHUNCAVÍ, D.S. N°104/2018, D.S. N°30/2013.

El presente trabajo tiene por objetivo analizar datos de monitoreo de calidad del aire entre los años 2016 y 2019 en las estaciones Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Ventanas (comuna de Puchuncaví), Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur y Valle Alegre (comuna de Quintero) con el valor horario de dióxido de azufre contenido en el D.S. N°104/2018 del MMA que establece la “Norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre”.

Para en análisis de los datos se procede a hacer test de normalidad, al ver que no tienen una distribución normal se usa estadística descriptiva, series temporales (para analizar el cumplimiento normativo), gráficos de línea de la mediana (para visualizar el comportamiento del SO<sub>2</sub>), uso del ICAGSO<sub>2</sub> y percentiles para conocer el estado de la calidad del aire.

En cuanto a los resultados obtenidos en las series temporales se observa que en la mayoría de las estaciones disminuyen sus excedencias del valor horario normado (350 µg/m<sup>3</sup>N), la estación Quintero presenta el mayor número de excedencias, en 2019 con presenta 92 mediciones excedidas y la estación Ventanas (van en aumento desde 2016) con 75 mediciones sobrepasadas.

Respecto al comportamiento del SO<sub>2</sub>, no hay un patrón estacional definido que se replique año a año, pero si existe un patrón para el comportamiento horario de las mediciones. Las estaciones Quintero y Centro Quintero presentan un incremento en el nivel de las mediciones entre las 06:00 a.m. y las 08:00 a.m., las demás estaciones presentan un alza entre las 08:00 a.m. y las 12:00 p.m.

Según el ICAGSO<sub>2</sub> se registran en el año 2019 un total de 19 alertas, 5 pre-emergencias y 1 emergencia ambiental, siendo la estación Quintero la que más presenta estados de emergencia ambiental, en el año 2019 se han registrado: 14 alertas, 4 pre-emergencias y 1 emergencia.

En cuanto a los percentiles calculados, todas las estaciones se encuentran cumpliendo con el criterio normativo.

Se recomienda respetar el plazo estipulado para la revisión de normativa en el D.S. 38/2013 del MMA, es decir, 5 años, ya que para esta norma en particular transcurrieron 16 años para su actualización.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
METODOLOGÍA	4
FUNDAMENTO	5
ALCANCE	7
<b>CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES</b>	<b>8</b>
1.1. LA ATMÓSFERA Y LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	9
1.1.1. La composición de la atmósfera	9
1.1.2. La contaminación de atmosférica	11
1.1.2.1. Naturaleza de los contaminantes	12
1.1.2.2. Contaminantes físicos	12
1.1.2.3. Contaminantes químicos	13
1.1.2.4. Clasificación de los contaminantes químicos	15
1.2. PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS	17
1.2.1. Material particulado	17
1.2.2. Óxidos de nitrógeno	17
1.2.3. Óxidos de azufre	18
1.2.4. Monóxido de carbono	18
1.2.5. Compuestos orgánicos volátiles	19
1.2.6. Metales pesados	20
1.2.7. Oxidantes fotoquímicos	20
1.2.8. Hidrocarburos	21
1.3. FACTORES GEOGRÁFICOS Y CLIMATOLÓGICOS	21
1.3.1. Vientos	21
1.3.1.1. Brisa terral [9]	23
1.3.1.2. Brisa valle-montaña [10]	24
1.3.2. Topografía	25
1.3.3. Gradiente vertical de temperaturas	26
1.3.3.1. Gradiente adiabático	27
1.3.3.2. Inversión térmica	28

1.4.	EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL MEDIO AMBIENTE	30
1.4.1.	Islas de calor	30
1.4.2.	Smog fotoquímico	31
1.4.3.	Lluvia ácida	31
1.4.4.	Destrucción de la capa de ozono	32
1.5.	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	33
1.5.1.	En el mundo	33
1.5.2.	En Chile	36
1.5.2.1.	Comunas de Quintero y Puchuncaví	39
1.5.2.2.	Episodios de contaminación en las comunas de Quintero y Puchuncaví	41
<b>CAPÍTULO 2: MARCO NORMATIVO</b>		<b>44</b>
2.1.	SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE [14]	46
2.1.1.	Red de monitoreo de la calidad del aire	47
2.1.1.1.	Red de monitoreo de la calidad del aire en Quintero y Puchuncaví	48
2.2.	NORMATIVA AMBIENTAL	50
2.2.1.	Normas de calidad ambiental	51
2.2.1.1.	Norma de calidad primaria de aire para dióxido de azufre	51
2.2.2.	Planes de prevención y descontaminación atmosférica	55
2.2.2.1.	Gestión de episodios críticos de contaminación [5]	57
2.2.2.2.	Plan de descontaminación atmosférica en Quintero y Puchuncaví	57
<b>CAPÍTULO 3: RESULTADOS</b>		<b>60</b>
3.1.	METODOLOGÍA	61
3.1.1.	Descripción	61
3.1.2.	Tipo de investigación [20]	61
3.1.3.	Hipótesis	61
3.1.4.	Diseño de la investigación	62
3.1.5.	Datos	62
3.1.6.	Fuente de datos	62
3.1.7.	Análisis de datos	63
3.2.	EXPRESIÓN DE CÁLCULO	63
3.2.1.	Prueba de Anderson - Darling	63
3.2.2.	Prueba de Kolmogorov - Smirnov	64
3.2.3.	Prueba de Grubbs para valores atípicos	64

3.2.4.	Percentil [20]	64
3.3	TEST DE NORMALIDAD	65
3.3.1.	Prueba de Anderson – Darling y Kolmogorov - Smirnov	65
3.3.2.	Prueba de homocedasticidad	65
3.4.	PRUEBA DE GRUBBS PARA VALORES ATÍPICOS	66
3.5.	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	71
3.5.1.	Estadística descriptiva estación Centro Quintero	71
3.5.2.	Estadística descriptiva estación La Greda	72
3.5.3.	Estadística descriptiva estación Loncura	73
3.5.4.	Estadística descriptiva estación Los Maitenes	74
3.5.5.	Estadística descriptiva estación Puchuncaví	75
3.5.6.	Estadística descriptiva estación Quintero	76
3.5.7.	Estadística descriptiva estación Sur	77
3.5.8.	Estadística descriptiva estación Valle Alegre	78
3.5.9.	Estadística descriptiva estación Ventanas	79
3.6.	CAPACIDAD DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO	80
3.6.1.	Series temporales	80
3.6.2.	Comportamiento del SO <sub>2</sub> en las comunas de Quintero y Puchuncaví	85
3.7.	CUMPLIMIENTO PRELIMINAR DEL D.S. N°104/2018	90
3.7.1.	Índice de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre	90
3.7.2.	Percentil	91
	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>92</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>999</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXOS</b>	<b>103</b>

### INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Capas de la atmósfera	11
Figura 1-2.	Contaminantes primarios y secundarios del aire	16
Figura 1-3.	Circulación del aire en la tierra	22
Figura 1-4.	Movimiento de aire en la tierra considerando rotación	22
Figura 1-5.	Brisa tierra-mar	24

Figura 1-6.	Brisa valle-montaña a) día y b) noche	25
Figura 1-7.	Topografía y viento	25
Figura 1-8.	Gradiente de temperatura	26
Figura 1-9.	Gradiente adiabático húmedo, seco y ambiental	27
Figura 1-10.	Gradiente vertical ambiental	28
Figura 1-11.	Inversión térmica patrón normal	29
Figura 1-12.	Inversión térmica	29
Figura 1-13.	Perfil de las islas de calor en ciudades	31
Figura 1-14.	Lluvia ácida	32
Figura 1-15.	Toneladas de emisiones por región en 2017	37
Figura 1-16.	Composición de las emisiones en % para SO <sub>2</sub> , PM y NO <sub>x</sub>	37
Figura 1-17.	Parque industrial zona Quintero-Puchuncaví	40
Figura 2-1.	Ubicación de estaciones de monitoreo en línea de calidad del aire	50
Figura 2-2.	Elaboración de un plan de prevención y/o descontaminación	56
Figura 2-3.	Emisiones porcentual zona Quintero, Puchuncaví y Concón	59

### **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1-1.	Composición gaseosa de la atmósfera	9
Tabla 1-2.	Naturaleza de los contaminantes atmosféricos	12
Tabla 1-3.	Ejemplos de contaminantes primarios y secundarios	15
Tabla 1-4.	Niveles de CO ambiental y % COHb en la sangre	19
Tabla 1-5.	Guía de calidad del aire PM <sub>2,5</sub> de la OMS	34
Tabla 1-6.	Exposición a PM <sub>2,5</sub> en µg/m <sup>3</sup> , 2000-2017	35
Tabla 1-7.	Exposición a PM <sub>2,5</sub> en % de la población, 2000-2017	36
Tabla 1-8.	Exposición a PM <sub>2,5</sub> en Chile, 2000 - 2017	38
Tabla 1-9.	Empresas del parque industrial Quintero-Puchuncaví	41
Tabla 2-1.	Estaciones de monitoreo de calidad del aire en Quintero y Puchuncaví	49
Tabla 2-2.	Guía de calidad de aire de la OMS para SO <sub>2</sub>	52
Tabla 2-3.	Actualización valor anual, 24 horas y horario de la norma de calidad primaria de SO <sub>2</sub>	52
Tabla 2-4.	Actualización episodios de emergencia ambiental de la norma de calidad primaria de SO <sub>2</sub>	53
Tabla 2-5.	Índices de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre	53

Tabla 2-6.	Niveles de emergencia ambiental para dióxido de azufre	55
Tabla 2-7.	Emisiones zona Quintero, Puchuncaví y Concón años 2015-2017	58
Tabla 3-1.	Prueba normalidad Anderson – Darling y Kolmogorov – Smirnov	65
Tabla 3-2.	Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar	66
Tabla 3-3.	Resultado prueba homogeneidad de varianza	66
Tabla 3-4.	Estadísticos de estación Centro Quintero	71
Tabla 3-5.	Estadísticos de estación La Greda	72
Tabla 3-6.	Estadísticos de estación Loncura	73
Tabla 3-7.	Estadísticos de estación Los Maitenes	74
Tabla 3-8.	Estadísticos de estación Puchuncaví	75
Tabla 3-9.	Estadísticos de estación Quintero	76
Tabla 3-10.	Estadísticos de estación Sur	77
Tabla 3-11.	Estadísticos de estación Valle Alegre	78
Tabla 3-12.	Estadísticos de estación Ventanas	79
Tabla 3-13.	ICAGSO <sub>2</sub> estaciones de monitoreo de calidad del aire	90
Tabla 3-14.	Percentiles de estaciones de monitoreo de calidad del aire	91

### **INDICE DE GRÁFICOS**

Gráfico 3-1.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Puchuncaví	67
Gráfico 3-2.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Ventanas	67
Gráfico 3-3.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Los Maitenes	68
Gráfico 3-4.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación La Greda	68
Gráfico 3-5.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Quintero	69
Gráfico 3-6.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Centro Quintero	69
Gráfico 3-7.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Loncura	70
Gráfico 3-8.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos atípicos estación Sur	70
Gráfico 3-9.	Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Valle Alegre	71
Gráfico 3-10.	Histograma y gráfica boxplot de estación Centro Quintero	72

Gráfico 3-11. Histograma y gráfica boxplot de estación La Greda	73
Gráfico 3-12. Histograma y gráfica boxplot de estación Loncura	74
Gráfico 3-13. Histograma y gráfica boxplot de estación Los Maitenes	75
Gráfico 3-14. Histograma y gráfica boxplot de estación Puchuncaví	76
Gráfico 3-15. Histograma y gráfica boxplot de estación Quintero	77
Gráfico 3-16. Histograma y gráfica boxplot de estación Sur	78
Gráfico 3-17. Histograma y gráfica boxplot de estación Valle Alegre	79
Gráfico 3-18. Histograma y gráfica boxplot de estación Ventanas	80
Gráfico 3-19. Serie de tiempo de estación Puchuncaví	80
Gráfico 3-20. Serie de tiempo de estación Los Maitenes	81
Gráfico 3-21. Serie de tiempo de estación Ventanas	81
Gráfico 3-22. Serie de tiempo de estación La Greda	82
Gráfico 3-23. Serie de tiempo de estación Quintero	82
Gráfico 3-24. Serie de tiempo de estación Centro Quintero	83
Gráfico 3-25. Serie de tiempo de estación Loncura	83
Gráfico 3-26. Serie de tiempo de estación Sur	84
Gráfico 3-27. Serie de tiempo de estación Valle Alegre	84
Gráfico 3-28. Gráfica lineal de la mediana estación Puchuncaví	85
Gráfico 3-29. Gráfica lineal de la mediana estación Ventanas	85
Gráfico 3-30. Gráfica lineal de la mediana estación Los Maitenes	86
Gráfico 3-31. Gráfica lineal de la mediana estación La Greda	86
Gráfico 3-32. Gráfica lineal de la mediana estación Centro Quintero	87
Gráfico 3-33. Gráfica lineal de la mediana estación Loncura	87
Gráfico 3-34. Gráfica lineal de la mediana estación Sur	88
Gráfico 3-35. Gráfica lineal de la mediana estación Loncura	88
Gráfico 3-36. Gráfica lineal de la mediana estación Quintero	89

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1. Carta Gantt de trabajo de titulación	104
---	-----

## SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

### SIGLAS:

AD	: Anderson – Darling
CENMA	: Centro Nacional del Medio Ambiente
CODELCO	: Corporación Nacional del Cobre
COHb	: Carboxihemoglobina
COV	: Compuestos Orgánicos Volátiles
D.S.	: Decreto Supremo
Desv. Est.	: Desviación Estándar
EAE	: Evaluación Ambiental Estratégica
EMRP	: Estación de Monitoreo con Representación Poblacional
EMRPG	: Estación de Monitoreo con Representación Poblacional por gases
ENAMI	: Empresa Nacional de Minería
ENAP	: Empresa Nacional del Petróleo
EPA	: Environmental Protection Agency
FPA	: Fondo de Protección Ambiental
G	: Valor prueba de Grubbs
GCA	: Guía de Calidad del Aire
GEC	: Gestión de Episodios Críticos
IGA	: Instrumentos de Gestión Ambiental
INE	: Instituto Nacional de Estadísticas de Chile
KS	: Kolmogorov – Smirnov
Máx.	: Máximo
Mín.	: Mínimo
MINSAL	: Ministerio de Salud
MMA	: Ministerio de Medio Ambiente
MOP	: Ministerio de Obras Públicas
N	: Número de muestras
N°	: Número
OCDE	: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ONEMI	: Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior
P	: Valor p

PAC	: Participación Ciudadana
PAN	: Nitrato de Peroxiacilo
PDA	: Plan de Descontaminación Atmosférica
PIV	: Parque Industrial Ventanas
PPDA	: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica
PREMVAL	: Plan Regulador Metropolitano de Valparaíso
PRI	: Plan Regulador Comunal
RCA	: Resolución de Calificación Ambiental
Res.	: Resolución
RETC	: Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
S.A.	: Sociedad Anónima
SEIA	: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SINCA	: Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire
SNASPE	: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado
USEPA	: United States Environmental Protection Agency
UTM	: Universal Transverse Mercator
UV	: Ultravioleta
UV-B	: Radiación ultravioleta B
WHO	: World Health Organization

### **SIMBOLOGÍAS:**

%	: porcentaje
<	: menor
>	: mayor
≤	: menor que
≥	: mayor que
°C	: grados Celsius
μg/m <sup>3</sup>	: microgramos por metro cúbico
μg/m <sup>3</sup> N	: microgramos por metro cúbico normal
μm	: micrómetros
Ar	: argón
As	: arsénico
Br	: bromo
Cd	: cadmio

CH<sub>4</sub> : metano  
Cl : cloro  
CO : monóxido de carbono  
CO<sub>2</sub> : dióxido de carbono  
Cr : cromo  
dB : decibel  
g/cm<sup>3</sup> : gramos por centímetro cuadrado  
H<sub>2</sub> : hidrógeno  
H<sub>2</sub>O : agua  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : ácido sulfúrico  
He : helio  
Hg : mercurio  
HNO<sub>3</sub> : ácido nítrico  
I : yodo  
k : percentil  
km : kilómetros  
Kr : kriptón  
Mo : molibdeno  
MP10 : material particulado de 10 micrones  
MP2,5 : material particulado de 2,5 micrones  
MW : megavatios  
n : número de datos  
N<sub>2</sub> : nitrógeno  
N<sub>2</sub>O : monóxido de dinitrógeno  
Ne : neón  
NH<sub>3</sub> : amoníaco  
NO : monóxido de nitrógeno  
NO<sub>2</sub> : dióxido de nitrógeno  
NO<sub>3</sub> : nitrato  
NO<sub>x</sub> : óxidos de nitrógeno  
O<sub>2</sub> : oxígeno  
O<sub>3</sub> : ozono  
OI-1 : Objetivo Intermedio 1  
OI-2 : Objetivo Intermedio 2  
OI-3 : Objetivo Intermedio 3  
Pb : plomo  
pH : medida de acidez o alcalinidad

PM : material particulado  
ppm : partes por millón  
q : constante 0,985  
SO<sub>2</sub> : dióxido de azufre  
SO<sub>3</sub> : trióxido de azufre  
SO<sub>x</sub> : óxidos de azufre  
ton/año : toneladas por año  
Xe : xenón  
x<sub>k</sub> : posición de un valor  
x<sub>n</sub> : número total de muestra  
 $\alpha$  : nivel de significancia

## **INTRODUCCIÓN**

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humano. Sin embargo, su contaminación sigue presentando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Según una evaluación de la Organización Mundial de la Salud son más de dos millones las muertes prematuras que se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire [1].

Según de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, se estima que, en el año 2017, en Chile el 97% de la población se encuentra expuesta a PM<sub>2,5</sub> en niveles superiores a los recomendados por la Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud.

El crecimiento económico del país ha llevado a ubicar zonas industriales a lo largo del territorio nacional, pero existen zonas donde se ubica un gran número de industrias denominadas zonas de sacrificio. El concepto de zona de sacrificio fue acuñado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y se define como “sectores geográficos de alta concentración industrial, en los que se ha priorizado el establecimiento de polos industriales, por sobre el bienestar de las personas y el medio ambiente”. En Chile existen cinco zonas de sacrificio ubicadas en Tocopilla, Mejillones, Huasco, Puchuncaví y Coronel.

“Es así como de las 28 termoeléctricas a carbón que operan en el país, 27 se concentran en solo cinco comunas: en Tocopilla son 7, Mejillones son 8, Huasco son 5, Puchuncaví son 5 y en Coronel son 3” (Informe Comisión Especial de la Cámara de Diputados de Chile, pág. 3, 2019). Este tipo de industrias emiten contaminantes a la atmósfera como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), material particulado (MP<sub>10</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y metales pesados (como Hg, As, Pb, entre otros). Adicionalmente, las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> son precursores en la atmósfera de ácidos nítrico y sulfúrico, -ambos componentes de la lluvia ácida- y del material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>) (Cortés et al., 2019).

Cabe destacar que en estas zonas no solo se ubican termoeléctricas que funcionan a carbón, sino que también fundiciones de metales, empresas químicas, terminales de gas y petróleo, bodegas con concentrados provenientes de la minería, entre otras, que aportan contaminantes como los ya mencionados.

En cuatro de estas comunas se superan las normas de calidad del aire y han debido ser declaradas zonas saturadas o latentes de contaminantes atmosféricos y en consecuencia sometidas a planes de descontaminación (KAS Ingenieros, 2017).

En las comunas de Quintero y Puchuncaví se emplazan diversas fuentes o actividades emisoras de SO<sub>2</sub> (fundiciones de metales, centrales termoeléctricas que utilizan carbón, las industrias que usan petróleo, entre otras).

La salud de las personas que viven allí se ha visto fuertemente afectada en diversas ocasiones, en los últimos años han ocurrido una serie de problemas de salud a los lugareños por episodios de contaminación (principalmente intoxicación por nubes tóxicas).

El SO<sub>2</sub> una vez en la atmósfera, puede presentar en un corto período de tiempo, neblinas ácidas que ocasionan efectos agudos y crónicos sobre la salud de las personas y en especial de los grupos vulnerables (como asmáticos, infantes, niños y ancianos) y, también, puede causar efectos negativos en el medio ambiente.

A causa de los episodios de contaminación y la presión social, es que en el año 2019 se ha publicado el D.S. N°104/2018 del MMA que establece “norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre”, la cual ha actualizado al D.S. N°113/2002 del MINSEFPRES, se han establecido nuevos valores para la norma anual y diaria, se ha incorporado un valor horario de calidad del aire para SO<sub>2</sub>. Además, se han establecido nuevos valores para los niveles de emergencia ambiental (alerta, pre-emergencia y emergencia).

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el valor horario de dióxido de azufre según el D.S. N°104/2018 del Ministerio del Medio Ambiente que establece la “Norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre”.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar datos entregados por el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire de las estaciones de monitoreo en línea de las comunas de Quintero y Puchuncaví.
- Analizar los datos obtenidos con el fin de conocer el estado de la calidad del aire.

## **METODOLOGÍA**

La revisión de los antecedentes generales que respectan a la calidad del aire y su importancia con principal enfoque en las zonas de Quintero y Puchuncaví, se realizar en base a bibliografía procedente de las diversas bibliotecas, información del Ministerio y Superintendencia de Medio Ambiente, la Cámara de Diputados de Chile. Por otro lado, la revisión del marco normativo atinente a la calidad del aire se realiza en la Biblioteca del Congreso Nacional.

Se plantea la hipótesis de investigación, el diseño de la investigación, selección y la recopilación de los datos, que en este caso es desde Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire. Luego, se hace el análisis de los datos y posteriormente el reporte de los resultados.

## FUNDAMENTO

En las comunas de Quintero y Puchuncaví se emplazan fuentes o actividades emisoras de SO<sub>2</sub> como fundiciones de cobre, las centrales termoeléctricas que utilizan carbón, las industrias que usan petróleo y, en menor medida, empresas químicas, el transporte terrestre y marítimo (puerto de Ventanas) que utiliza derivados del petróleo, entre otras actividades industriales ubicadas en la bahía de Quintero.

La salud de las personas que viven allí se ha visto fuertemente afectada en diversas ocasiones, en los últimos años han ocurrido una serie de problemas de salud los lugareños por episodios de contaminación:

- En marzo del año 2011 desde la división Ventanas de la empresa CODELCO se genera una nube tóxica que dejó a niños y niñas de la Escuela Básica La Greda, con diversos síntomas de intoxicación, lo que en noviembre de ese mismo año se volvió a repetir, registrándose 31 niños y niñas y 9 adultos. A raíz de este suceso, la escuela fue clausurada y reubicada en otro lugar dentro de la comuna.
- En el año 2014 se produjo el derrame de 38 mil litros de crudo al mar de un buque con la terminal de una de las empresas del complejo, hechos que se reiteraron en el año 2015 y en mayo del 2016.
- En septiembre del 2015, hubo una nueva intoxicación de 40 alumnos del nuevo establecimiento, debiendo ser cerrado. Además, ese año se publica el D.S. N°10/2015 del Ministerio del Medio Ambiente que declara zona saturada por material particulado fino respirable PM<sub>2,5</sub>, como concentración anual y latente como concentración diaria, y zona latente por material particulado respirable PM<sub>10</sub>, como concentración anual, a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
- En el año 2018 en agosto se genera una crisis ambiental y sanitaria con múltiples intoxicaciones, lo cual conlleva a declarar alerta sanitaria amarilla en las comunas. Luego, el septiembre del mismo año se genera una nueva intoxicación generándose una nueva alerta sanitaria. Se declaran 62 alertas tempranas de 24 horas.
- El día 01 de agosto de 2019 se detectaron intoxicaciones en, a lo menos, 10 alumnos del sector la greda luego de presentar varios peak en las gráficas de calidad del aire. El día 20 de agosto de 2019 se detectaron intoxicaciones en alumnos del colegio Sargento Aldea de Puchuncaví. Además, se declaran en este mismo año 44 alertas tempranas de 24 horas, 5 alertas ambientales, 1 pre-

emergencia ambiental y 1 emergencia ambiental, además, el protocolo de Gestión de Episodios Críticos se ha activado 141 veces durante el mismo año.

El SO<sub>2</sub> una vez en la atmósfera, puede presentar en un corto período de tiempo, neblinas ácidas que ocasionan efectos agudos y crónicos sobre la salud de las personas y en especial de los grupos vulnerables (como asmáticos, infantes, niños y ancianos) y, también, puede causar efectos negativos en el medio ambiente.

“Algunos de los efectos sobre las personas pueden ser irritación de ojos, nariz y garganta, problemas respiratorios, dolor de cabeza, enfermedades cardiovasculares, impactos en el sistema respiratorio como reducción de la función pulmonar y asma” (Anteproyecto Norma primaria de dióxido de azufre, MMA, 2015).

En el medio ambiente, los óxidos de azufre son agentes causantes de lluvia ácida, dependiendo del tiempo y concentración de exposición puede causar diversos efectos en los ecosistemas. “Puede causar en algunas plantas áreas muertas en sus hojas, lesiones crónicas, pero depende de la especie y factores ambientales como la humedad, temperatura, nivel de nutrientes, entre otros” (Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*). Los efectos de la lluvia ácida en el ambiente pueden ser la acidificación de los suelos, acidificación de las aguas continentales superficiales y subterráneas, disolución e infiltración de metales tóxicos, daño y destrucción de vegetación, deterioro en construcciones y materiales, destrucción de microorganismos simbiotes, disminución de especies vegetales y animales.

Cabe destacar que, según el informe de la Cámara de Diputados de Chile de la comisión investigadora de episodios de contaminación en las zonas de Quintero, Puchuncaví y Concón, en la zona existía sólo un plan de descontaminación aprobado en el año 1992 que obliga solamente a las empresas CODELCO y AES GENER a establecer una red de monitoreo de sus emisiones y a cumplir normas de calidad del aire para material particulado (MP10) y Anhídrido Sulfuroso (SO<sub>2</sub>). Debido a la falta de regulación para las demás empresas, el Ministerio del Medio Ambiente, elabora un Plan de Descontaminación global para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, el cual entra en vigencia el 01 de abril de 2019.

## **ALCANCE**

En este trabajo de título se analizan los datos entregados por las 9 estaciones de monitoreo en línea de calidad del aire del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) entre el 01-01-2016 y el 30-09-2019 ubicadas en las comunas de Quintero y Puchuncaví, específicamente las estaciones de Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Ventanas, Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur y Valle Alegre.

La normativa aplicable utilizada en el presente trabajo es el D.S. N° 104/2018 del Ministerio de Medio Ambiente que “Establece la norma primaria de calidad del aire para dióxido de azufre”, específicamente se utiliza el límite horario referido al dióxido de azufre, cuya concentración es  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Además, se utilizan los valores establecidos como índices de calidad de aire de gases referido a dióxido de azufre (ICAGSO<sub>2</sub>) que permiten calificar la calidad del aire con respecto al dióxido de azufre y determinar si se han generado niveles de emergencia.

También, se analiza el comportamiento estacional y horario del dióxido de azufre en las 9 estaciones de monitoreo de calidad del aire en las fechas indicadas anteriormente.

## **CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES GENERALES**

## 1. ANTECEDENTES GENERALES

### 1.1. LA ATMÓSFERA Y LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE

#### 1.1.1. La composición de la atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea al planeta Tierra y tiene una altura que se extiende aproximadamente hasta por 10.000 km sobre la superficie terrestre. En la atmósfera se producen todos los fenómenos climáticos y meteorológicos que afectan al planeta y está constituida por una mezcla de gases que se observa en la tabla 1-1 y aerosoles.

Tabla 1-1: Composición gaseosa de la atmósfera

<b>Componente</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Tiempo de permanencia</b>
nitrógeno	N <sub>2</sub>	78,08	10 <sup>6</sup> años
oxígeno	O <sub>2</sub>	20,95	5.10 <sup>3</sup> años
dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,030	15 años
argón	Ar	0,9300	-
vapor de agua	H <sub>2</sub> O	0 – 4	10 días
neón	Ne	0,0018	-
helio	He	0,0005	10 <sup>7</sup> años
kriptón	Kr	0,0001	-
hidrógeno	H <sub>2</sub>	0,0001	7 años
ozono	O <sub>3</sub>	0,000002	2 años
xenón	Xe	0,0001	-
metano	CH <sub>4</sub>	0,0002	5 años
monóxido de dinitrógeno	N <sub>2</sub> O	0,00002	8 años
monóxido de carbono	CO	0,00001	6 meses
amoniaco	NH <sub>3</sub>	0,0000006	7 días

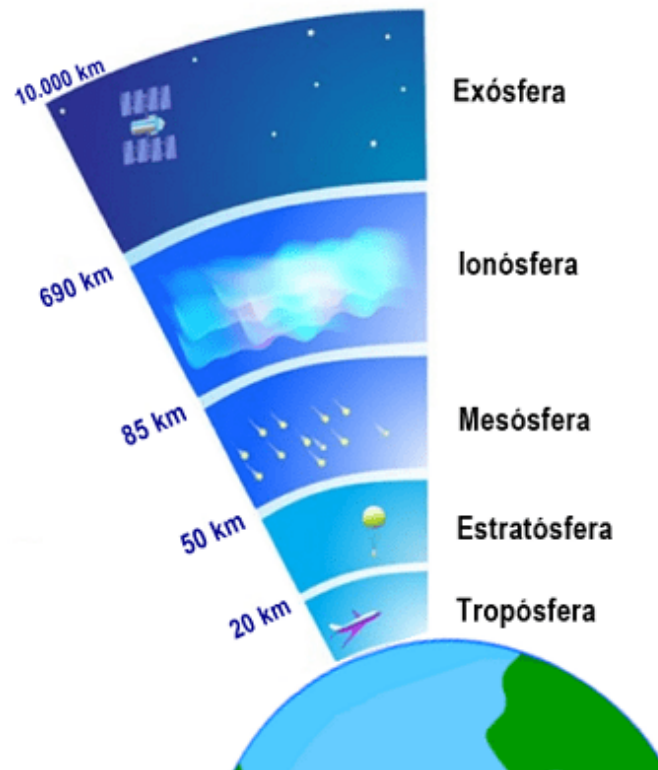
Fuente: Guía de calidad del aire, MMA

Estos gases se distribuyen de manera homogénea (la mayoría) en toda la superficie terrestre dentro de la tropósfera, excepto el contenido de agua que varía según la ubicación geográfica. En capas superiores la composición varía, ya que se presentan especies catiónicas y aniónicas por la fotoionización y la fotodisociación que la radiación UV origina [2].

Los aerosoles que componen la atmósfera son materiales sólidos o líquidos que se encuentran en suspensión en la atmósfera. Pueden provenir de actividades antropogénicas (combustión de combustibles fósiles, calefacción residencial, actividad industrial, etc.) como naturales (erosión, erupciones volcánicas, incendios forestales, aerosoles marinos, entre otras.)

Además, en función de la temperatura existen diversas capas que se ilustran en la figura 1-1 y se detallan a continuación:

- Exósfera: es la capa exterior de la atmósfera, constituye la zona de transición entre nuestra atmósfera y el espacio exterior, contiene la mayor parte del ozono atmosférico y absorbe gran parte de la radiación ultravioleta.
- Termósfera o Ionósfera: en ésta la temperatura aumenta nuevamente con la altura. La presencia de partículas electrizadas da lugar a la presencia de capas ionizadas que tienen la propiedad de reflejar las ondas radioeléctricas.
- Mesósfera: la temperatura disminuye con la altura debido a la disminución de la concentración de ozono.
- Estratósfera: en esta capa la temperatura comienza a aumentar con la altura, fenómeno que se le atribuye a la presencia del ozono ( $O_3$ ), puesto que es el gas que absorbe los rayos ultravioletas. Tanto la formación como la destrucción del ozono, se hace por reacciones fotoquímicas.
- Tropósfera: es la capa más cercana a la superficie terrestre, donde se forman las nubes y se desarrollan diversos procesos atmosféricos tales como las lluvias y los frentes. La temperatura del aire disminuye con la altura. En esta capa se acumula la mayor parte del vapor de agua y el  $CO_2$ .



Fuente: [www.globoterraqueo.world](http://www.globoterraqueo.world)

Figura 1-1. Capas de la atmósfera. Escala en km

### 1.1.2. La contaminación atmosférica

La ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia sobre las bases generales del medio ambiente define a un contaminante como todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental [3].

La contaminación se define como “la presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente” (ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia).

La contaminación atmosférica es un problema a nivel mundial, “la OMS estimó que una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica” (WHO, GBoD 2016). La contaminación

atmosférica se define, según el glosario del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire, como “la presencia de contaminantes en la atmósfera, tales como polvo, gases o humo en cantidades y durante períodos de tiempo tales que resultan dañinos para los seres humanos, la vida silvestre y la propiedad. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o producidos por el hombre directa o indirectamente”.

Según datos de la OCDE para 2017 el 97% de la población de Chile se encuentra expuesta a niveles superiores de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Cifras del Ministerio de Medio Ambiente sitúan alrededor de 10 millones de chilenos expuestos a niveles perjudiciales de contaminantes atmosféricos dañinos para la salud o, incluso, que pueden causar la muerte [4].

#### 1.1.2.1. Naturaleza de los contaminantes

Según la naturaleza de los contaminantes podemos distinguir entre contaminantes físicos y químicos ilustrados en la tabla 1-2.

Tabla 1-2: Naturaleza de los contaminantes atmosféricos

<b>Naturaleza</b>	<b>Tipo</b>
<b>Contaminantes físicos</b>	Contaminación acústica
	Contaminación por radiación electromagnética
	Contaminación radiactiva
<b>Contaminantes químicos</b>	Contaminantes primarios
	Contaminantes secundarios

Fuente: Elaboración propia a partir de Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*

#### 1.1.2.2. Contaminantes físicos

Cuando se habla de contaminantes físicos se refiere básicamente a la contaminación generada por la energía emitida al medio ambiente, puede ser en forma de ondas mecánicas, electromagnéticas o radiación.

#### A. Contaminación acústica

Este término engloba ruidos y vibraciones, es un tipo de contaminación muy frecuente en las zonas urbanas y en las instalaciones industriales. Los sonidos muy fuertes provocan molestias que pueden ir desde un sentimiento de desagrado e incomodidad hasta la generación de daños irreversibles en el sistema auditivo. La medida de los niveles de presión acústica se hace en decibelios (dB) [2].

Con el desarrollo de zonas urbanas e industriales, este tipo de contaminación ha adquirido una gran importancia como contaminante atmosférico.

#### B. Contaminación electromagnética

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada por los átomos en forma de ondas electromagnéticas (rayos gamma o rayos X) o partículas (partículas alfa, beta o neutrones). Su origen natural se encuentra en procesos radiactivos y en las radiaciones cósmicas, mientras que su origen antrópico se encuentra en fugas de centrales nucleares, rayos X, centros de investigación donde se emplean isótopos radiactivos, etc.

En los últimos 50 años han proliferado los campos electromagnéticos artificiales, especialmente los de baja frecuencia, originando un fenómeno de contaminación antropogénica al verse los seres vivos expuestos a campos electromagnéticos adicionales. Este hecho puede causar alteraciones en los organismos, pues los campos y corrientes eléctricos endógenos intervienen en los procesos fisiológicos, por lo que una exposición indiscriminada a unos campos descontrolados puede provocar alteraciones en los citados procesos [2].

#### C. Contaminación radiactiva

La presencia en la corteza terrestre de radionucleidos contribuye a la radiactividad de la atmósfera mediante la introducción de material procedente de la misma, fundamentalmente por acción erosiva del viento. Los principales isótopos que se introducen corresponden a las series del uranio y del potasio-40. También, los procesos de combustión, especialmente de carbón, aportan a la atmósfera isótopos radiactivos, fundamentalmente el radon-222. La presencia de radiaciones, ocasionada por accidentes o uso indebido de materiales radiactivos puede constituir un fenómeno de contaminación de enorme importancia, dado el gran potencial de ocasionar daños a los seres vivos que tiene este tipo de radiaciones [2].

### 1.1.2.3. Contaminantes químicos

El origen de los contaminantes químicos puede ser natural (fuentes biogénicas) o provenir de acciones y actividades de los humanos (fuentes antropogénicas).

#### A. Fuentes biogénicas

Proviene de eventos o actividades que se producen de manera natural, tales como: erupciones volcánicas, incendios forestales, erosiones, tormentas de polvo, entre otras.

#### B. Fuentes antropogénicas

Corresponden a actividades o acciones realizadas por los humanos, tales como: combustión de materiales, ya sea a nivel industrial o doméstico (vehículos o en el hogar), generación de electricidad por vía térmica, uso de disolventes, transporte y agricultura.

Hay que considerar algunos aspectos cuando hablamos de contaminación en las zonas urbanas:

- Se trata de una contaminación localizada, de forma que, aunque a nivel global el origen de una determinada sustancia sea mayoritariamente natural, en los puntos geográficos en que tiene lugar la emisión la proporción se altera claramente. Por ejemplo, se calcula que, aunque aproximadamente el 90% del CO existente en la atmósfera tiene un origen natural, en la atmósfera de una ciudad como Nueva York entre el 95-98% del CO presente tiene un origen antropogénico.
- Las emisiones se producen en puntos geográficos donde la existencia de sumideros es menor. Normalmente, la naturaleza es un sumidero importante. En las áreas urbanas o industriales, que es donde mayormente se producen las emisiones antropogénicas a la atmósfera, la presencia de asfalto, cemento, materiales de construcción diversos, etc., hace que la cantidad de especies vegetales o de suelo que pueden actuar como sumidero sea sensiblemente inferior a la de una zona rural.
- La difusión de los contaminantes depende de la climatología. Los factores meteorológicos no siempre van a ser los mismos y, en determinadas condiciones, podrán producirse episodios de contaminación de mayor gravedad.

- La capacidad de algunos agentes contaminantes de sufrir transformaciones provoca la aparición de compuestos totalmente ausentes en la composición del aire natural [2].

Estos contaminantes se clasifican en:

- Fuentes fijas: son aquellas ubicadas en un lugar fijo (sin movimiento). Generalmente se asocian a las emisiones generadas por la quema de combustibles producto de actividades industriales y residenciales.
- Fuentes móviles: corresponde a fuentes que pueden desplazarse de un lugar a otro. Generalmente se asocian a emisiones de gases en tubos de escape, desgaste de frenos y neumáticos de distintos tipos de transporte motorizado, como automóviles, camiones, buses y motocicletas
- Fuentes fugitivas o de área: corresponde a emisiones que no son canalizadas por ningún sistema. Estas emisiones pueden ser por el tránsito de vehículos por calles sin pavimentar, de la construcción y las demoliciones, entre otras.

#### 1.1.2.4. Clasificación de los contaminantes químicos

Los contaminantes de la atmósfera consisten en una gran variedad de gases, vapores y partículas, cuya presencia y cantidad afecta a las personas, las plantas, los animales y los materiales. Según sea el origen de los contaminantes, éstos pueden clasificarse en dos grandes grupos los primarios y los secundarios. En la tabla 1-3 se pueden observar algunos contaminantes primarios y secundarios (figura 1-2).

Tabla 1-3: Ejemplos de contaminantes primarios y secundarios

<b>Contaminantes primarios</b>	<b>Contaminantes secundarios</b>
óxidos de carbono (CO)	ozono troposférico (O <sub>3</sub> )
compuestos nitrogenados (NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub> , NO)	ácido nítrico
compuestos azufrados (SO <sub>x</sub> y SO <sub>2</sub> )	ácido sulfúrico
material particulado (MP10 y MP2,5)	sulfatos
hidrocarburos	nitratos
metales (Pb, As, Hg)	hidrocarburos secundarios

Fuente: Elaboración propia a partir de apuntes personales



Fuente: [www.educarchile.cl](http://www.educarchile.cl)

Figura 1-2: Contaminantes primarios y secundarios del aire

A. Contaminantes primarios

Son aquellos que proceden directamente de la fuente de emisión, tales como artefactos de calefacción domiciliarios, chimeneas industriales y tubos de escape de automóviles.

B. Contaminantes secundarios

Son aquellos originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por sus reacciones con los componentes naturales de la atmósfera.

C. Contaminantes criterio

Los contaminantes del aire que se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos se han llamado contaminantes criterio.

Se han denominado de esta forma, ya que fueron objeto de evaluaciones de la calidad del aire en Estados Unidos para establecer niveles permisibles que protejan la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población. Algunos de estos contaminantes

son: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), material particulado (PM), plomo (Pb) y monóxido de carbono (CO).

## 1.2. **PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS**

Debido al creciente desarrollo industrial y económico existe una variada gama de actividades que se desarrollan en diversos lugares. Con ello, se emiten más y variados contaminantes a la atmósfera que pueden causar diversos efectos en la salud de la población y en el medio ambiente.

### 1.2.1. Material particulado

El material particulado (PM) tiene una diversa composición es muy variada, pudiendo ser orgánica e inorgánica, se encuentra en forma sólida y líquida en de diversos diámetros, pero los más conocidos son partículas de 10 µm (PM10) y 2,5 µm (PM2,5) de diámetro. Pueden provenir de actividades industriales de variadas índoles (combustión de carbón, petróleo, leña, entre otras), caminos sin pavimentar, construcciones, vientos que arrastren de forma natural partículas del suelo.

El PM10 y el PM2,5 son respirables, pudiendo (el más pequeño) penetrar y depositarse en los alveolos pulmonares causando enfermedades respiratorias y cardiovasculares en la población expuesta.

Las partículas al depositarse recubren las hojas y taponan los estomas, lo que interfiere en la función clorofílica e impide un desarrollo normal de la planta, que ve detenido su crecimiento (Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*).

### 1.2.2. Óxidos de nitrógeno

Estos compuestos se forman principalmente por nitrógeno y oxígeno, formados por dióxido de nitrógeno, óxido nítrico, trióxido de nitrógeno y óxido nitroso, pero los más relevantes dentro del grupo son el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el óxido nítrico (NO), ya que el primero es un precursor de la lluvia ácida al reaccionar con la humedad atmosférica y el segundo es un gas de efecto invernadero. Además, los NO<sub>x</sub> son precursores del smog fotoquímico.

Debemos tener en cuenta que la toxicidad de los  $\text{NO}_x$  en sí mismos no es elevada, el NO resulta menos problemático que el  $\text{NO}_2$ , dada la mayor toxicidad de este último. A las concentraciones del aire ambiental estos gases en sí mismos no resultan problemáticos, aunque con un incremento de la concentración, y especialmente en ambientes cerrados, pueden alcanzarse niveles tales que lleguen a originar irritación ocular y respiratoria [5], como enfermedades en pulmones y bronquios, mayor susceptibilidad a las infecciones, daño celular, irritación ocular y pérdida de las mucosas” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA). Se consideran concentraciones letales para la mayor parte de las especies animales aquellas superiores a 100 ppm de  $\text{NO}_2$ .

### 1.2.3. Óxidos de azufre

Son compuestos formados por azufre y oxígeno, principalmente destacan el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). Proviene principalmente de la combustión de petróleo y carbón, de forma natural se genera en la actividad volcánica y degradación anaeróbica de la materia orgánica.

Al ser emitido a la atmósfera estos compuestos se pueden oxidar y formar sulfatos, en presencia de agua (humedad) pueden formar ácidos que contribuyen a la lluvia ácida y se pueden adherir al PM.

“Estos gases pueden alterar el funcionamiento de los bronquios, producir daño pulmonar y a las vías respiratorias, irritación ocular y paros cardíacos en la población” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA). Además, pueden causar daños en el ecosistema, como en diversos tipos de hojas, va a depender de la concentración y el tiempo de exposición, puede tener efectos agudos o crónicos. La última directiva sobre niveles de dióxido de azufre de la Unión Europea establece el valor límite de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para protección de ecosistemas (Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*).

### 1.2.4. Monóxido de carbono

Este compuesto se forma por la combustión incompleta de los combustibles en diversas actividades como el transporte (fuente principal), industrias, viviendas, humo de tabaco, explosivos entre otras.

Tiene efectos perjudiciales en la salud, ya que altas concentraciones de CO pueden causar cambios fisiológicos y patológicos y, finalmente, la muerte. Principalmente el daño que produce es que el CO sustituye al oxígeno en la sangre formando la carboxihemoglobina (COHb), lo que produce un menor transporte de

oxígeno en la sangre, una disminución de las funciones neuroconductuales, menor peso en niños recién nacidos y retardo en el desarrollo postnatal (tabla 1-4) [5].

Tabla 1-4: Niveles de CO ambiental y % COHb en la sangre

Concentración de CO en el aire ambiental (mg/Nm <sup>3</sup> )	Concentración de equilibrio de COHb en sangre (%)	Efectos
< 4	< 1,0	No hay efectos aparentes.
4 – 12	1,0 – 2,0	Hay alguna evidencia de efectos sobre la conducta.
12 – 35	2,0 – 5,0	Efectos en el sistema nervioso central. Efectos en el discernimiento de los intervalos de tiempo, agudeza visual, discernimiento de la luminosidad, y algunas otras funciones psicomotoras.
35 – 74	5,0 – 10,0	Alteraciones cardíacas y pulmonares.
74 – 625	10,0 – 80,0	Dolores de cabeza, fatiga, somnolencia, coma, fallos respiratorios, muerte.

Fuente: Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). *Contaminación ambiental: una visión desde la química*.

#### 1.2.5. Compuestos orgánicos volátiles

Los COV se producen en actividades que impliquen la quema de combustibles como el transporte, uso de carbón, madera y gas natural. Se componen de carbono, hidrógeno, oxígeno, fósforo, azufre, halógenos (Cl, Br, I, etc.), entre otros.

“Estos compuestos pueden producir irritación de ojos, garganta y pulmones, así como inhibición del crecimiento de las plantas. También se asocia a una mayor probabilidad de desarrollar leucemia y otros tipos de cáncer” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA).

### 1.2.6. Metales pesados

De acuerdo a la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), incluyen a los siguientes elementos: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, plata, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo [6].

Los metales pesados se pueden presentar de manera natural en el medio ambiente, en la corteza terrestre o como consecuencia de las actividades humanas (origen antropogénico). Actividades como la minería, fundiciones, combustión del petróleo (gasolinas) liberan metales a la atmósfera, los que pueden depositarse en agua o suelo, forman nuevos compuestos que pueden ser aún más tóxicos (como lo es el caso del metilmercurio).

Metales pesados como el Cr, Cd y Mo pueden causar daños renales, pulmonares, en el sistema nervioso central, hepáticos y problemas en las articulaciones. El Pb se bioconcentra en la sangre y llegando a “elevados niveles de plomo en la sangre derivan en problemas hematológicos, daño al sistema nervioso central, disturbios gastrointestinales, problemas a los riñones y es perjudicial en el desarrollo mental de los niños” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA).

### 1.2.7. Oxidantes fotoquímicos

Estos compuestos son contaminantes secundarios, se forman en la atmósfera al reaccionar los NO<sub>x</sub>, COV e hidrocarburos en presencia de la luz solar, es decir, son contaminantes de origen fotoquímico. En este grupo podemos encontrar al O<sub>3</sub>, nitrato de peroxiacilo (PAN) y aldehídos.

A medida que la exposición es mayor, los efectos también lo son. Provocan tos y dolores de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta, incremento de la mucosidad, estertores, cierre de las vías respiratorias, dolores de tórax, languidez, malestar y náuseas, con aumento en la incidencia de ataques asmáticos. También puede agravar enfermedades crónicas del corazón [5]. En plantas, los oxidantes producen daños agudos y crónicos que se manifiestan en la aparición de procesos necróticos en las hojas y disminución de crecimiento y producción. La intensidad de los daños depende de la concentración, tiempo de exposición y naturaleza del oxidante al que estén expuestas y también del tipo de planta [2].

### 1.2.8. Hidrocarburos

Están formados por hidrógeno y carbono, se pueden originar en emisiones del transporte (automóviles, buses, aeronaves, ferrocarriles, entre otros), industrias, calefacción, combustión de combustibles y eliminación de residuos sólidos.

Los hidrocarburos se pueden clasificar en alifáticos (alcanos, alquenos y alquinos) y aromáticos (poseen un anillo de benceno).

La exposición a hidrocarburos puede afectar a los pulmones, sistema gastrointestinal y sistema nervioso.

## 1.3. FACTORES GEOGRÁFICOS Y CLIMATOLÓGICOS

Los contaminantes se emiten al aire de diversas fuentes (móviles, fijas o de área), dependiendo del lugar geográfico, hay ciertos factores que tienen un importante rol en el movimiento de las emisiones de contaminantes, su concentración y en la calidad del aire, (como el viento, la topografía, entre otros, tienen un comportamiento estacional y diario) ya que tienen incidencia directa en la dispersión y difusión de los mismos.

Chile presenta cuatro unidades de relieve o estructuras morfológicas principales, que juegan un rol significativo en la determinación de la calidad del aire en los principales asentamientos humanos: las planicies costeras, la cordillera de la costa, la depresión intermedia y los valles interiores, y la cordillera andina [5].

### 1.3.1. Vientos

A nivel de macroescala, la atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la Tierra y se encuentra en constante movimiento (figura 1-3). La radiación índice de forma directa en la latitud 0° (Ecuador) por lo que el aire se calienta, es menos denso y asciende, y se mueve hacia latitudes inferiores dirigiéndose hacia el norte y sur del planeta. Luego, el aire se enfría, se vuelve más denso y desciende, moviéndose a latitudes mayores hasta llegar a la zona del Ecuador.

Hay que considerar el movimiento rotacional de la tierra, en donde las masas de aire no solo ascienden y descienden, si no que se mueven en diferentes direcciones dependiendo de la latitud donde se encuentren. Las masas de aire y todos los objetos en movimiento en el hemisferio Norte se desvían hacia la derecha y en el hemisferio Sur, se

desvían hacia la izquierda. Esta desviación en el patrón del flujo de aire se denomina efecto de Coriolis [8].



Fuente: Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). Ecología. PEARSON

Figura 1-3: Circulación del aire en la tierra

Este efecto da origen a vientos predominantes y células (figura 1-4): Célula polar (vientos polares del Este), Célula Ferrel (vientos del Oeste), Célula Hadley (vientos alisios del Noreste), Depresión Ecuatorial (vientos alisios del Sudeste) y Frente subtropical de altas presiones (vientos del Oeste y vientos polares del Este).



Fuete: Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). Ecología. PEARSON

Figura 1-4: Movimiento de aire en la tierra considerando rotación

En Chile, en el norte y centro del país, durante las estaciones de primavera y verano, dominan los vientos sur y suroeste, en cambio en los periodos de otoño e invierno dominan los vientos del norte y noroeste. Desde Chiloé hasta las Islas Diego Ramírez imperan, en toda estación, los vientos constantes del oeste, que azotan con gran intensidad la región patagónica. El Frente Polar tiene gran influencia en el extremo sur del territorio, por cuanto corresponde a un sector de grandes trastornos y severos conflictos atmosféricos con abundantes precipitaciones, debido al encuentro de masas de aire cálido (Bravos del Oeste) y de aire frío de origen polar [5].

A nivel local, existen vientos que se ven influenciados por el relieve, el día y la noche, los cuerpos de agua, entre otros factores, conocidos como vientos que se mueven desde el mar a la tierra y desde el valle a las montañas o “tierra-mar y valle-montaña” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA).

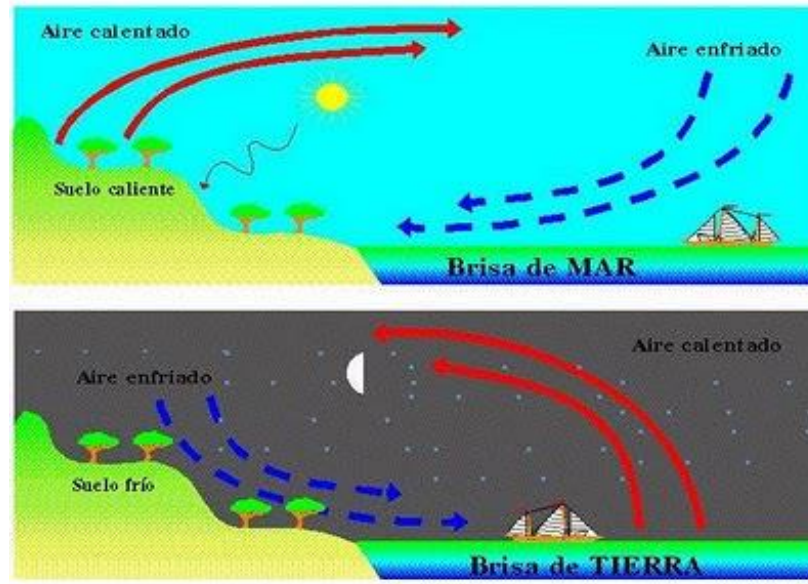
#### 1.3.1.1. Brisa terral [9]

Existe una desigual conducta térmica de las aguas y de las tierras. Mientras las tierras absorben y pierden energía muy rápidamente, las aguas lo hacen a una velocidad menor. Esto se debe a que las aguas poseen un calor específico más alto y es necesario consumir mayor cantidad de energía para elevar su temperatura. Las tierras se enfrían más rápido ya que tienen un mayor poder de emisión.

Todo lo anterior genera un flujo de aire condicionado por los centros de alta y baja presión producidos por las diferencias térmicas diarias que se desarrollan en el mar y la costa.

De esta manera, durante el día el continente se calienta más rápido que el mar generando un centro de baja que condiciona un viento hacia el interior. En la noche, se produce el fenómeno inverso ya que la tierra irradia el calor acumulado durante el día y el mar presenta temperaturas más elevadas, atrayendo hacia sí el centro de baja. Consecuentemente, el viento cambia y se dirige del continente al mar (figura 1-5).

Otro factor importante es que la diferencia térmica entre el mar y la tierra es mayor durante el día; por lo tanto, los vientos diurnos son de mayor magnitud que los nocturnos. Solo al amanecer los vientos tierra-mar adquieren mayor fuerza al aumentar las diferencias térmicas de ambos accidentes geográficos.



Fuente: [climaytemperatura.wordpress.com](http://climaytemperatura.wordpress.com)

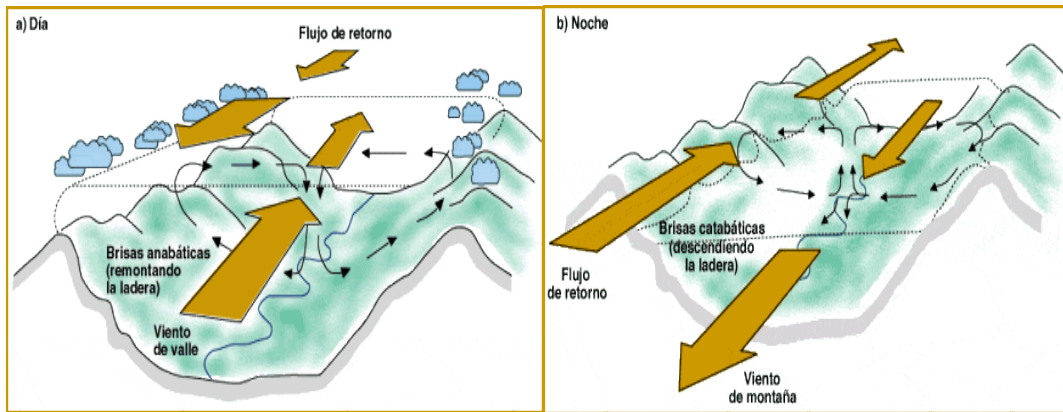
Figura: 1-5: Brisa tierra-mar

#### 1.3.1.2. Brisa valle-montaña [10]

Los rayos solares inciden desigualmente en las laderas de las montañas y en los valles; asimismo, varían su ángulo de incidencia a lo largo del día según la trayectoria del sol. Esto genera un flujo de aire condicionado por los centros de alta y baja presión producidos por las diferencias térmicas diarias que se desarrollan entre el valle y las montañas.

En este caso, las laderas de solana se calientan más rápidamente que los fondos de valles de un cordón montañoso. El flujo de aire durante el día va desde el valle hacia las partes más altas, que hacen de centros de baja respecto a los fondos de valle. Esto es en dos sentidos: a lo largo del valle hacia los sectores superiores y desde el fondo del valle hacia las laderas (figura 1-6 a y b).

En la noche se produce el enfriamiento rápido de las laderas respecto del valle y los vientos cambian.



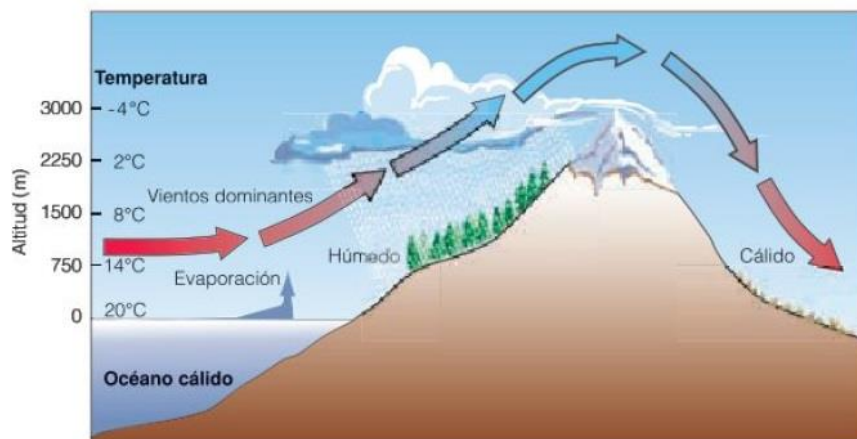
Fuente: <http://www7.uc.cl>

Figura 1-6: Brisa valle-montaña a) día y b) noche

### 1.3.2. Topografía

El viento al encontrarse con una montaña asciende, se enfría y se satura con vapor de agua y libera humedad a mayor altura lo que se denomina barlovento. Luego, ese aire frío se comienza a perder humedad, se comienza a calentar y desciende lo que se denomina sotavento (figura 1-7).

El barlovento y sotavento dan características importantes a lugar donde inciden, ya que en cada uno se desarrolla flora y fauna con características de humedad diferentes. A este viento húmedo del lado del barlovento se le denomina sombra de lluvia.



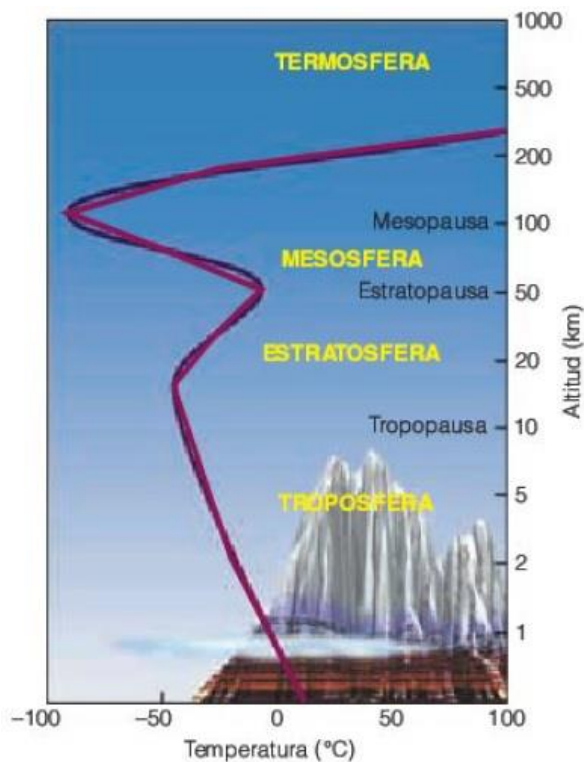
Fuente: Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). Ecología. PEARSON

Figura 1-7: Topografía y viento

### 1.3.3. Gradiente vertical de temperaturas

El comportamiento de la atmósfera cuando el aire se desplaza verticalmente depende de la estabilidad atmosférica. Una atmósfera estable resiste la circulación vertical; el aire que se desplaza verticalmente en ella tiende a regresar a su posición inicial. Esta característica de la atmósfera le confiere la capacidad de dispersar los contaminantes emitidos al aire. Para comprender la estabilidad atmosférica y su importancia en la dispersión de la contaminación, es fundamental al entender los mecanismos de la atmósfera porque están relacionados con la circulación atmosférica vertical [11].

Como se puede observar en la figura 1-8, existe un perfil vertical de temperatura vs altitud, a medida que aumenta la altura, disminuye la temperatura como ocurre en la tropopausa (capa entre la tropósfera y la estratósfera) y entre la estratopausa y la mesopausa. Entre la tropopausa y la estratopausa existe una zona donde la temperatura aumenta con la altura, al igual que sobre la mesopausa.



Fuente: Smith, T. M., & Smith, R. L. (2007). Ecología. PEARSON

Figura 1-8: Gradiente de temperatura

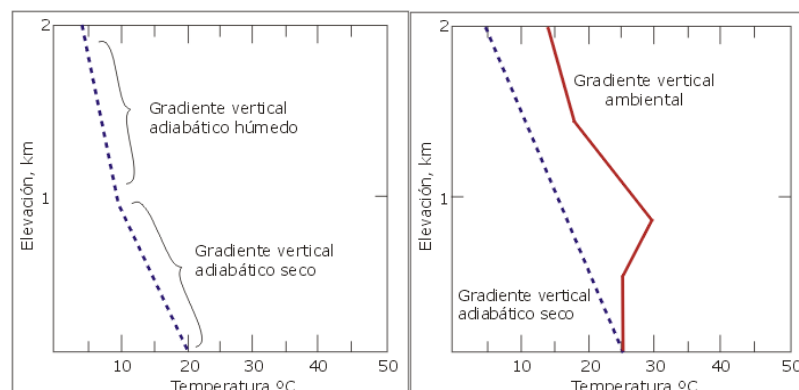
### 1.3.3.1. Gradiente adiabático

El gradiente adiabático (figura 1-9) es la variación de la temperatura de las masas de aire de forma vertical en la atmósfera. Este gradiente puede ser seco (una porción de aire que asciende se enfría, pero no cede energía a su entorno) o húmedo (una porción de aire asciende y se enfría hasta alcanzar su punto de rocío, el vapor de agua se condensa formándose nubes y liberando el calor latente [12]).

Según el comportamiento del gradiente adiabático y la temperatura podemos distinguir entre:

- **Atmósfera inestable:** la temperatura de la atmósfera desciende más rápido que el gradiente adiabático la masa de aire sigue subiendo, ya que tiene una temperatura mayor que la del aire que la rodea
- **Atmósfera estable:** la temperatura de la atmósfera varía más lento que la del gradiente adiabático por lo que la masa de aire se encuentra más fría que el aire que la rodea y no sigue ascendiendo, si no que baja a su posición inicial
- **Atmósfera neutra:** la temperatura de la atmósfera desciende coincidiendo con la del gradiente adiabático

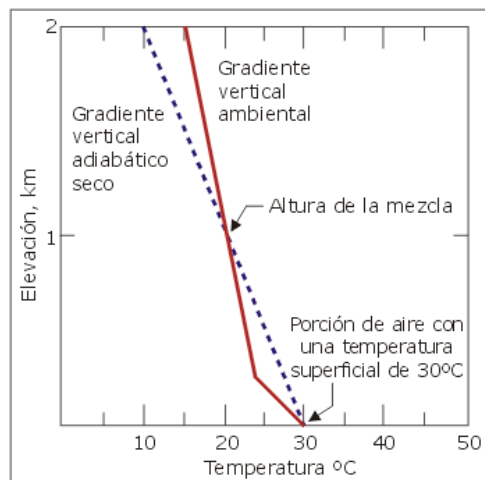
El gradiente ambiental, es el resultado de complejas interacciones complejas producidas por factores meteorológicos y generalmente se considera que consiste en una disminución en la temperatura con la altura. Es particularmente importante para la circulación vertical, ya que la temperatura del aire circundante determina el grado en el que una porción de aire se eleva o desciende [11].



Fuente: [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

Figura 1-9: Gradiente adiabático húmedo, seco y ambiental

Otro concepto importante es la altura de mezcla de los gases, en donde el gradiente adiabático y gradiente ambiental interactúan (figura 1-10). El punto donde la temperatura ambiente se intercepta con el gradiente vertical adiabático se conoce como la altura de mezcla, ya que en este punto las temperaturas se igualan y es hasta dónde puede llegar el ascenso de la masa de aire. El gradiente vertical ambiental es de suma importancia, ya que va a determinar la altura de mezcla de los contaminantes y dependiendo de la altura de este punto va a disponer de mayor o menor dispersión para los contaminantes.

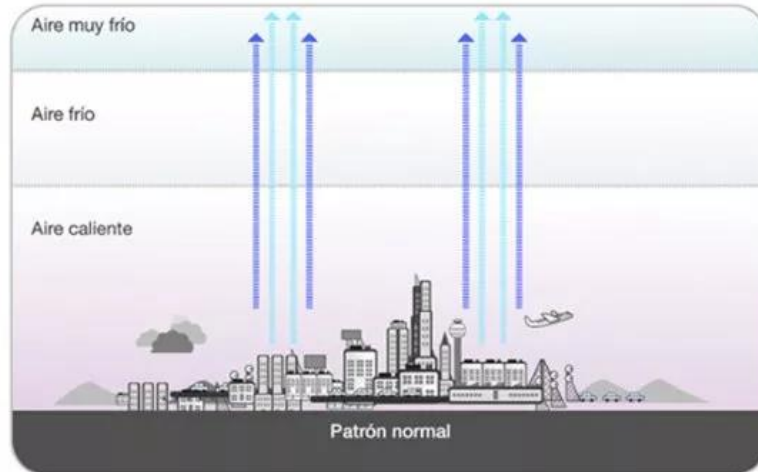


Fuente: [www.bvsde.paho.org](http://www.bvsde.paho.org)

Figura 1-10: Gradiente vertical ambiental

#### 1.3.3.2. Inversión térmica

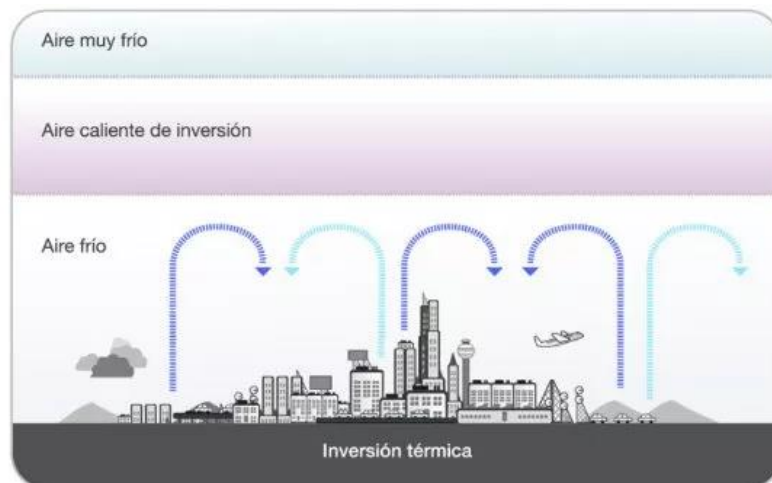
Como vimos en parte de esta sección, el aire se distribuye a través de capas, que, a su vez, están distribuidas en un gradiente vertical que a medida que aumente la altura disminuye su temperatura lo que es más notorio en las capas bajas de atmósfera y es conocido como inversión térmica. Como se observa en la figura 1-11, la inversión térmica en su patrón normal permite el flujo vertical de las masas de aire, ya que en la parte más baja el aire tiene una temperatura más elevada, por lo que es menos denso y puede ascender hasta capas superiores de la atmósfera en capas más frías.



Fuente: <http://www.mambiente.munimadrid.es>

Figura 1-11: Inversión térmica patrón normal

La inversión térmica ocurre cuando se altera el patrón normal de temperatura de las capas verticales (figura 1-12), lo que provoca que en la parte más cercana al suelo exista una capa de aire frío (por lo que se vuelve más denso y no asciende) y sobre ella la temperatura sea mayor (una capa de aire más caliente) lo que no permita el flujo vertical, por lo que dificulta la dispersión de los contaminantes emitidos desde la superficie.



Fuente: <http://www.mambiente.munimadrid.es>

Figura 1-12: Inversión térmica

Por una parte, la capa de inversión térmica se presenta a una menor altura, lo que reduce la dilución de contaminantes en dirección vertical. Por otra, los vientos alisios o planetarios se debilitan, generándose períodos de calma que pueden durar varios días y, a esto se suma, el encajonamiento propio de las zonas urbanas respecto de los cordones montañosos circundantes, lo que reduce las posibilidades de dispersión lateral de los contaminantes. Se generan así las condiciones propicias para su concentración en los períodos más fríos [5].

#### **1.4. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL MEDIO AMBIENTE**

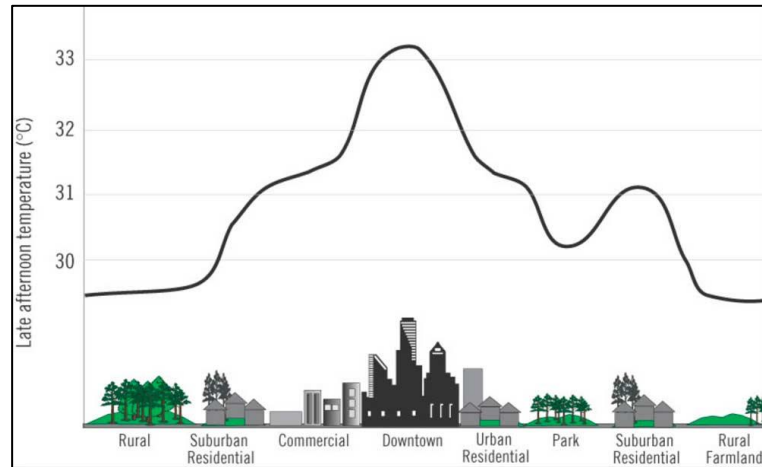
La incorporación de contaminantes a la atmósfera puede tener efectos en la calidad del aire, ya que afectan la composición del aire del lugar de la emisión.

Los efectos de la contaminación del aire pueden ser, según su alcance geográfico, a nivel local, regional y global.

##### **1.4.1. Islas de calor**

Las islas de calor se forman en zonas urbanas por la existencia de estructuras o edificaciones que limitan la normal circulación de las masas de aire y con ello se producen alzas de temperaturas en estas zonas versus zonas rurales (figura 1-13). Estas alzas de temperatura se deben a que el uso de cementos, asfaltos, techos oscuros o de materiales que absorben más calor. Las diferencias de temperatura, según el perfil de la figura 1-13, puede llegar hasta 3°C más en zonas urbanas.

Cabe destacar que, al emplazarse zonas urbanas, las áreas verdes decrecen lo que también contribuye a la formación de las islas de calor, ya que la vegetación por el fenómeno de evapotranspiración tiene un rol termorregulador en el entorno.



Fuente: [www.natura-medioambiental.com](http://www.natura-medioambiental.com)

Figura 1-13: Perfil de las islas de calor en ciudades. Escala en °C

#### 1.4.2. Smog fotoquímico

Este fenómeno tiene origen, principalmente, en grandes ciudades donde exista gran tráfico de vehículos e industrias que emiten contaminantes al aire, además, factores como la radiación y el poco movimiento de masas de aire contribuyen a la formación del smog.

El esmog o smog fotoquímico se forma a partir de las reacciones entre la luz solar y los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y/o compuestos orgánicos volátiles (COV). Estas reacciones provocan la formación de ozono ( $\text{O}_3$ ) o dióxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y otros contaminantes secundarios como formaldehído y cetonas [5].

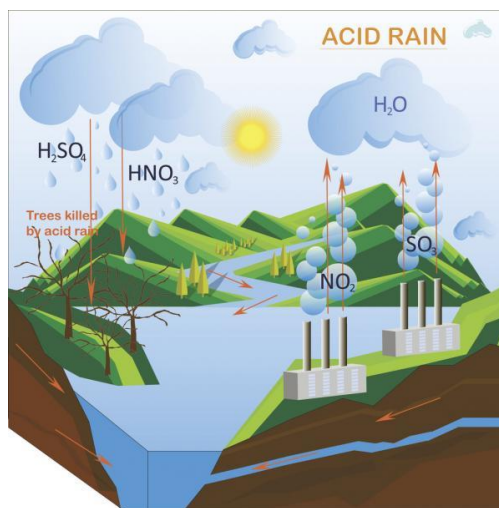
“La producción de esmog fotoquímico oscurece la atmósfera dejando un aire teñido de color marrón rojizo, cargado de componentes dañinos para la salud de las personas y del medio ambiente” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA).

#### 1.4.3. Lluvia ácida

Es una precipitación (lluvia, niebla, nieve, polvo o humo) que se produce por las emisiones, naturales o antropogénicas, de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  a la atmósfera, los cuales reaccionan con la humedad presente en el aire y forman ácidos como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o  $\text{HNO}_3$  (figura 1-14). Presenta un pH inferior a 5.6, “pudiendo llegar hasta niveles tan bajos como 2.5 o 1.5” (Guía de Calidad del Aire 2018, MMA) que son perjudiciales para los ecosistemas.

Cabe destacar que la lluvia naturalmente es ácida. Su pH puede ser hasta de 5,6 debido a que el  $\text{CO}_2$  presente en el aire reacciona con el agua de lluvia formando un ácido débil (el ácido carbónico). Esta lluvia es benéfica, ya que ayuda a disolver algunos minerales presentes en el suelo que son necesarios para los animales y las plantas [5].

Los efectos de la lluvia ácida en los ecosistemas pueden ser acidificación de los suelos, acidificación de las aguas continentales superficiales y subterráneas, disolución e infiltración de metales tóxicos, daño y destrucción de vegetación, deterioro en construcciones y materiales, destrucción de microorganismos simbiotes y disminución de especies vegetales y animales.



Fuente: [www.ecologiaverde.com](http://www.ecologiaverde.com)

Figura 1-14: Lluvia ácida

#### 1.4.4. Destrucción de la capa de ozono

En la estratósfera se ubica la capa de ozono aproximadamente entre los 15 km y 50 km sobre la superficie terrestre. Esta capa cumple la función de reflejar la radiación proveniente del sol, específicamente la UV-B que es dañina.

El ozono estratosférico tiene un ciclo natural de formación, en donde una secuencia de reacciones, a partir del  $\text{O}_2$  y la radiación, producen (y a la vez destruyen) moléculas de  $\text{O}_3$ . Estas reacciones de formación y destrucción tienen un equilibrio que permite mantener una concentración más o menos constante de  $\text{O}_3$  estratosférico.

Existen sustancias llamadas agotadoras de la capa de ozono, que son emitidas por acciones antropogénicas, las cuales comienzan a reaccionar o catalizan las reacciones

con el ozono estratosférico y de esta forma lo agotan. Las sustancias agostadoras de la capa de ozono son los óxidos de nitrógeno, clorofluorocarbonos, halones (contienen bromo) y freones (contienen cloro y flúor) y halometanos.

Sin este efecto filtrante de la capa de ozono, aumenta la radiación ultravioleta que llega a nivel del suelo. Si la radiación UV no es absorbida en las cantidades adecuadas, puede causar impactos negativos en variadas especies. En las personas, la exposición a UV-B aumenta los riesgos de cáncer de piel, de cataratas, avejenta la piel y debilita el sistema inmunológico. También puede disminuir el crecimiento de plantas y afectar a organismos unicelulares y sistemas acuáticos [5].

## **1.5. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA**

### **1.5.1. En el mundo**

La OCDE cuenta con un indicador ambiental llamado exposición a la contaminación del aire PM<sub>2,5</sub> es el contaminante del aire que representa el mayor riesgo para la salud a nivel mundial, afectando a más personas que cualquier otro contaminante. La exposición crónica a PM<sub>2,5</sub> aumenta considerablemente el riesgo de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en particular. Estamos midiendo promedios anuales. El porcentaje de población mide la exposición a más de 10 µg/m<sup>3</sup> [13].

La OMS propone valores de guía de calidad del aire para diversos contaminantes de importancia para la salud como lo es el PM<sub>2,5</sub> en la tabla 1-5 se puede observar estos valores y su fundamento.

Tabla 1-5: Guía de calidad del aire PM<sub>2,5</sub> de la OMS

	<b>MP10</b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>MP2,5</b> <b>(µg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Fundamento del nivel elegido</b>
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	70	35	Estos niveles están asociados con un riesgo de mortalidad a largo plazo alrededor de un 15% mayor que con el nivel de las GCA.
Objetivo intermedio-2 (OI-2)	50	25	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad prematura en un 6% aproximadamente [2-11%] en comparación con el nivel del OI-1.
Objetivo intermedio-3 (OI-3)	30	15	Además de otros beneficios para la salud, estos niveles reducen el riesgo de mortalidad en un 6% [2-11%] aproximadamente en comparación con el nivel del OI-2.
Guía de calidad del aire (GCA)	20	10	Estos son los niveles más bajos con los cuales se ha demostrado, con más del 95% de confianza, que la mortalidad total, cardiopulmonar y por cáncer de pulmón, aumenta en respuesta a la exposición prolongada al MP <sub>2,5</sub> .

Fuente: Guía de calidad del aire de la OMS relativas al PM, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, actualización mundial 2005

Como se puede observar en la tabla 1-6, de un total de 169 países, se analiza la exposición a PM<sub>2,5</sub> en µg/m<sup>3</sup> entre los años 2000 al 2017, se establecen los valores de la guía de calidad de aire de OMS (GCA) y sus objetivos intermedios (OI) se obtiene:

- Un total de 114 países se encuentra en la GCA de la OMS, lo que equivale al 7% aproximadamente (Canadá, Estonia, Finlandia, Islandia, Nueva Zelanda, Norway, Suecia, entre otros)
- Un total de 220 países se encuentra en el OI-3, lo que equivale al 13% aproximadamente (Dinamarca, Jamaica, Lituania, Luxemburgo, Reino Unido, entre otros)
- Un total de 511 países se encuentran en el OI-2, lo que equivale al 30% aproximadamente (Albania, Costa Rica, Cuba, Croacia, Venezuela, entre otros)
- Un total de 360 países se encuentran en el OI-1, lo que equivale al 21% aproximadamente (Bolivia, Chile, Perú, Sudáfrica, entre otros)
- Un total de 485 países se encuentran sobre el OI-1, lo que equivale al 29% aproximadamente (China, Egipto, India, Uganda, entre otros)
- Entre el año 2000 a 2017 el número de países que cumplieron con el valor GCA aumenta en 5, en 11 aumentan los países que cumplen con OI-3

- Desde el año 2000 al 2017 no hubo cambios en el número de países que cumplen con OI-2
- Desde el año 2000 al 2017 se registra una disminución de 9 países en OI-1 y de 7 países que exceden el OI-1

Tabla 1-6: Exposición a PM2,5 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 2000-2017

AÑO	GCA	OI-3	OI-2	OI-1	Excede
	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>&gt;35</b>
2000	9	18	51	37	54
2005	10	17	52	41	49
2010	9	16	54	41	49
2011	9	17	53	40	50
2012	11	21	49	40	48
2013	12	22	50	39	46
2014	13	25	50	35	46
2015	13	26	49	31	50
2016	14	29	52	28	46
2017	14	29	51	28	47
<b>total</b>	114	220	511	360	485

Fuente: Calidad y salud del aire: Exposición a partículas finas PM2.5 - países y regiones, OCDE

En la tabla 1-7, se muestran la exposición a PM2,5 se expresa en % de la población expuesta entre los años 2000 al 2017 en un total de 1.690 países, obteniendo que:

- En 94 países el % de población expuesta es menor a 25% entre el año 2000 y 2017 (Canadá, Estonia, Nueva Zelanda, Suecia, entre otros)
- En 7 países el % de la población expuesta está entre 25% y 50% entre el año 2000 y 2017 (Australia, Estados Unidos, Irlanda, entre otros)
- En 68 países el % de la población expuesta está entre 50% y 75% entre el año 2000 y 2017 (Portugal, OCDE total, España, entre otros)
- En 1.086 países el % de la población expuesta está entre el 75% y 100% entre el año 2000 y 2017 (Argentina, Chile, China, Perú, India, entre otros) y en 435

países el % de la población expuesta es el 100% entre el año 2000 y 2017 (Bolivia, Irak, Katar, Nepal, Hungría, entre otros)

- Entre el año 2000 y el 2017 el % de la población disminuye en 4 países para valores menores de 25% de exposición, en 5 países para valores entre el 75% y 100% y en 6 países para valores iguales a 100%
- Entre el año 2000 y el 2017 el % de la población aumenta en 5 países para valores menores de 25% de exposición y 10 países para valores entre el 50% y 75%

Tabla: 1-7: Exposición a PM<sub>2,5</sub> en % de la población, 2000-2017

AÑO	% POBLACIÓN EXPUESTA				
	<25	25-50	50-75	75-100	>=100
2000	7	4	2	110	46
2005	8	0	5	110	46
2010	8	0	7	109	45
2011	7	0	6	111	45
2012	8	0	8	110	43
2013	9	3	4	110	43
2014	12	0	5	109	43
2015	11	0	7	108	43
2016	12	0	12	104	41
2017	12	0	12	105	40
<b>total</b>	94	7	68	1.086	435

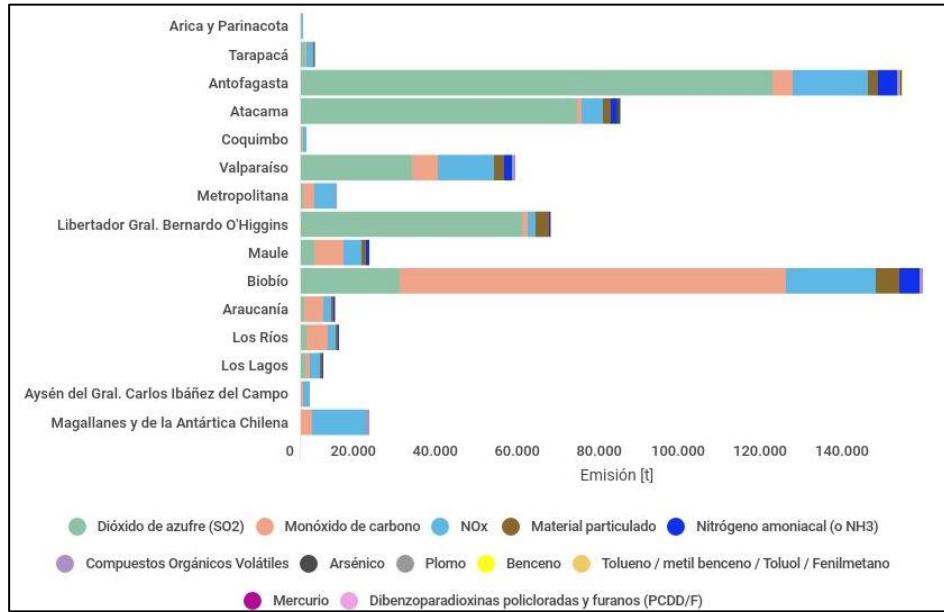
Fuente: Calidad y salud del aire: Exposición a partículas finas PM<sub>2.5</sub> - países y regiones, OCDE

### 1.5.2. En Chile

A lo largo del territorio nacional se han decretado 17 zonas saturadas y 2 zonas latentes en donde, según datos de Ley Chile, más del 95% de estas declaraciones, ya sea de zona latente o saturada, corresponde a material particulado (PM).

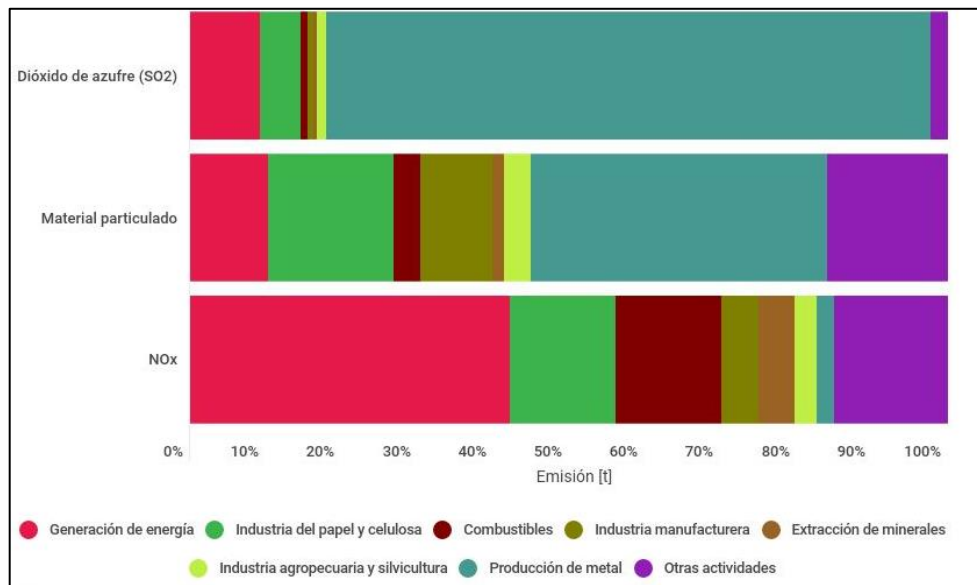
Los indicadores ambientales del RETC indican que, por región, las que más se encuentran expuestas a emisiones de contaminantes son las de Antofagasta, Biobío, Atacama, Libertador Gral. Bernardo O'Higgins y Valparaíso, principalmente por SO<sub>2</sub>, CO y NO<sub>x</sub> (figura 1-15). En la figura 1-16 se puede observar la composición de las emisiones según el rubro, donde generación de energía, producción de metal, industria

del papel y celulosa y otras actividades componen de forma mayoritaria a los NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y PM.



Fuente: MINSAL y RETC, 2017

Figura 1-15: Toneladas de emisiones por región en 2017



Fuente: MINSAL y RETC, 2017

Figura 1-16: Composición de las emisiones en % para SO<sub>2</sub>, PM y NO<sub>x</sub>

La OCDE en su último informe de desempeño de Chile del año 2016 afirma el PM10 y el PM2,5 constituyen la principal causa de preocupación por la calidad del aire en la mayoría de las ciudades, donde se concentran la combustión de leña y los medios de transporte. Existen normas relativas a la calidad del aire para controlar los principales contaminantes atmosféricos, que desde 2012 incluyen el nivel de PM2,5, pero este umbral se excede en forma habitual. Según datos de las estaciones nacionales de monitoreo, el 44% de las ciudades o regiones superó el límite anual de PM10 y el 15% excedió el nivel diario de PM10. Aproximadamente, el 15% de la población de Chile se encuentra expuesta a niveles graves de material particulado sobre de  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y que un 50% se encuentra expuesta a niveles altos de material particulado entre 10 y  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [13].

Según la encuesta de Medio Ambiente del año 2016 y 2018 realizada por Ministerio del Medio Ambiente el principal problema ambiental del país considerado por la ciudadanía es la contaminación del aire, obteniendo el año 2016 un 37% y el año 2018 un 32%.

Como se puede observar en la tabla 1-8, desde el año 2000 a 2017 la exposición a PM<sub>2,5</sub> ha disminuido en  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aunque sigue siendo un valor mayor al recomendado por la Guía de Calidad de Aire de la OMS, que es  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En cuanto a la exposición al mismo parámetro, en % de población, se puede decir que desde el año 2000 a 2017 ha disminuido en un 1% aproximadamente, estando (para 2017) el 97% de la población expuesta a este parámetro en niveles que puede ocasionar daños para la salud de la población.

Tabla 1-8: Exposición a PM<sub>2,5</sub> en Chile, 2000 – 2017

<b>Año</b>	<b>Exposición a PM<sub>2,5</sub> (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</b>	<b>Exposición a PM<sub>2,5</sub> (% de la población)</b>
2000	27,49	98,21
2005	27,41	98,25
2010	27,19	98,47
2011	28,59	98,50
2012	26,25	98,46
2013	25,41	98,45
2014	24,00	97,98
2015	23,73	97,71
2016	22,17	97,20
2017	22,14	97,29

Fuente: Calidad y salud del aire: Exposición a partículas finas PM<sub>2,5</sub> - países y regiones, OCDE

### 1.5.2.1. Comunas de Quintero y Puchuncaví

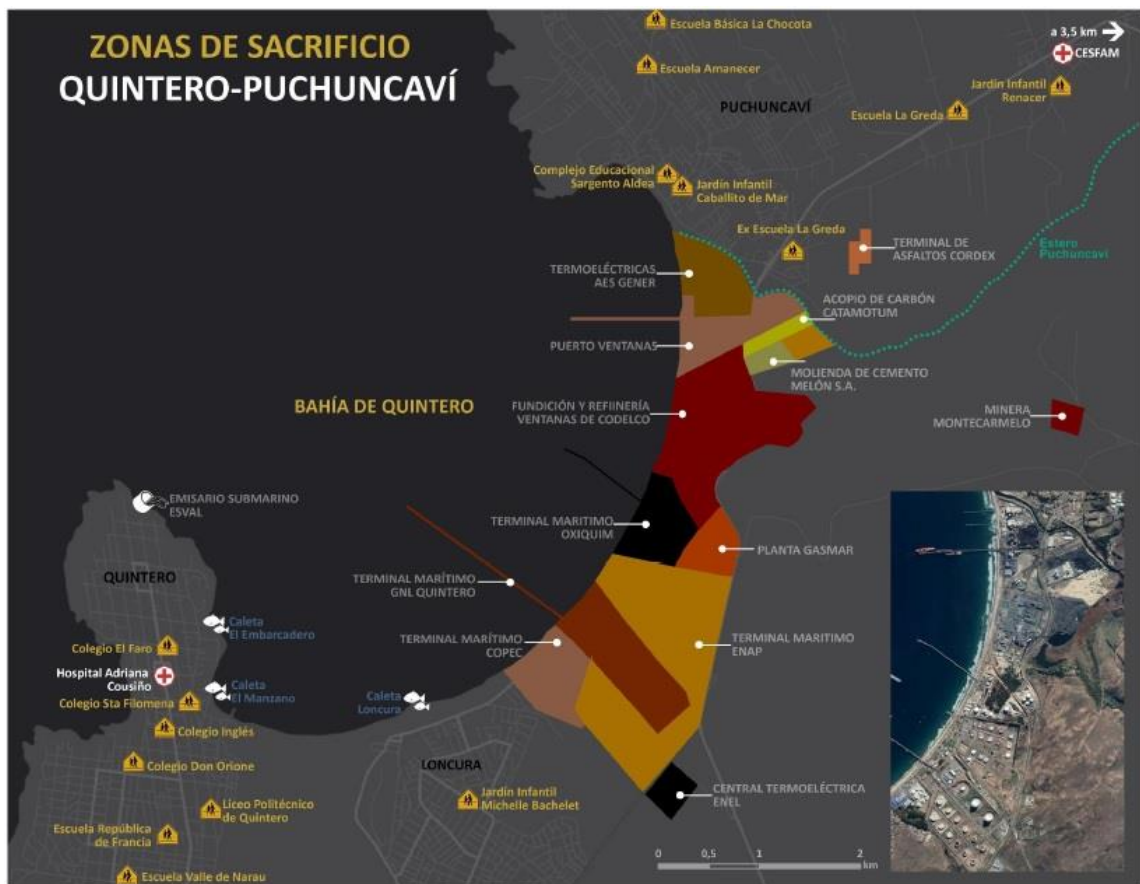
Las comunas de Quintero y Puchuncaví, están ubicadas en la zona costera de la región de Valparaíso. Quintero, tiene una población de 31.923 habitantes y, Puchuncaví, tiene una población de 18.546 habitantes según datos del INE.

El desarrollo histórico de estas comunas data desde hace más de 500 años. Durante la primera mitad del siglo pasado, la Bahía de Quintero era una zona dedicada principalmente a la pesca artesanal y al desarrollo de la agricultura en varias de sus localidades. Sin embargo, el origen del complejo industrial de Ventanas, puede trazarse a partir de la crisis de la década de 1930, tras la cual, se implementa en el país una política de Industrialización por Sustitución de Importaciones, que potencia el mercado interno y el desarrollo del sector secundario de la economía, en base a una importante participación del Estado en las empresas del país (Barton et al., 2008 y Claude 1997, citados en Rojas 2015). Es así que se instala en el año 1958, en la localidad de Ventanas, una termoeléctrica propiedad de la entonces empresa estatal Chilectra y, en el año 1964, la fundición Ventanas, de la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), dos grandes industrias que respondían al modelo de fomento productivo del Estado en un país en vías de desarrollo [14].

El parque industrial de Ventanas (PIV) queda ubicado en los límites de las comunas de Quintero y Puchuncaví, por lo que se rige bajo el plan regulador intercomunal de Valparaíso. El plan regulador intercomunal (PRI) data del año 1965, a través de los años se ha modificado (límites para el establecimiento de zonas industriales) lo que ha llevado a que el parque industrial de la zona se expanda. En el año 2014 se promulgó el plan regulador metropolitano de Valparaíso (PREMVAL), por lo que el PRI queda derogado, en donde se considera el aumento de la superficie para actividades industriales molestas, como también el aumento de áreas verdes para la mitigación de los impactos que estas industrias pueden generar. Actualmente, la bahía de Quintero alberga un parque industrial variado (figura 1-17), en la tabla 1-9 se pueden observar las industrias y los principales contaminantes asociados a las mismas.

En los últimos diez años los hitos ambientales más relevantes han sido (Terram ADC N°31), en el año entra en funcionamiento GNL Quintero, terminal marítimo de gasificación de gas licuado (ENAP), en el año 2010 entra en funcionamiento la termoeléctrica Nueva Ventanas (Gener), en el 2011 se da inicio al proceso de regulación de fundiciones de cobre (Res. N°300 del MMA), se promulga Norma de emisión de termoeléctricas (D.S N° 13/2011 del MMA), surge conflicto ambiental por presencia de metales pesados en escuela La Greda lo que dio origen a su relocalización, se da inicio a la actualización del Plan de Descontaminación de Ventanas y se firma Acuerdo de

Producción Limpia para abordar los problemas ambientales de la zona (a través de ASIVA); en el 2014 el MMA da a conocer resultados de cuatro estudios de riesgos y anuncia inicio del Programa para la Recuperación, en el marco de territorios vulnerables; en 2016 se actualiza el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví (el cual es rechazado y debe ser reingresado); y, finalmente en el año 2019 se publica el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas Concón, Quintero y Puchuncaví y la actualización la norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (D.S. N°104/2018 del MMA).



Fuente: fundación Terram, ADC N°31

Figura 1-17: Parque industrial zona Quintero-Puchuncaví

Tabla 1-9: Empresas del parque industrial Quintero-Puchuncaví

<b>Empresa</b>	<b>Tipo</b>	<b>Composición emisiones al aire</b>
AES GENER	termoeléctrica (carbón)	PM10, PM2,5, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, COV, Hg, tolueno, metil benceno, toluol, benceno
Puerto Ventanas	puerto	PM10, PM2,5, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub>
CODELCO Ventanas	fundición y refinería metales	PM10, PM2,5, SO <sub>x</sub> , As, Hg, COV, CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , tolueno, metil benceno, PCDD, PCDF, benceno, NO <sub>x</sub> , Pb, toluol
Oxiquim	química	Hg, NH <sub>3</sub> , As, Pb, PCDD, PCDF, CO <sub>2</sub> , PM10, PM2,5, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , COV, CO, tolueno, metil benceno, toluol, fenilmetano,
GNL Quintero	terminal gas licuado	PM10, PM2,5, NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, COV, Hg, tolueno, metil benceno, toluol, benceno
Shell	terminal y almacenes	NO <sub>x</sub> , CO, PM10, PM2,5, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , tolueno, metil benceno, toluol, fenilmetano, benceno, As
Copec	lubricantes, terminal y almacenes	NO <sub>x</sub> , PM10, PM2,5, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , tolueno, metil benceno, toluol, fenilmetano, benceno, As
ENAP REFINERÍAS	terminal, almacenes y cancha petcoque	COV, CO, NH <sub>3</sub> , tolueno, metil benceno, toluol, fenilmetano, As, Hg, PCDD, PCDF, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , PM10, PM2,5
GASMAR	almacenes	Hg, benceno, tolueno, metil benceno, toluol, fenilmetano, PCDD, PCDF, CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , CO, PM10, PM2,5, COV, NH <sub>3</sub>
Cemento Melón	planta producción y bodegas	PM10, PM2,5, COV, PCDD, PCDF, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , Hg, CO, NO <sub>x</sub> , NH <sub>3</sub>
Cordéx	producción de asfalto	PM10, PM2,5, NH <sub>3</sub> , tolueno, metil benceno, fenilmetano, As, COV, PCDD, PCDF, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Hg, CO
Catamontún	termoeléctrica (carbón)	NO <sub>x</sub> , PM10, PM2,5, SO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CO, COV, Hg, tolueno, metil benceno, toluol, benceno
Mínera Monte Carmelo	minera	PM10, PM2,5, metales pesados, benceno, COV, PCDD, PCDF, CO <sub>2</sub> , CO, tolueno, metil benceno

Fuente: Elaboración propia a partir datos emisiones al aire de fuentes puntuales RETC.

#### 1.5.2.2. Episodios de contaminación en las comunas de Quintero y Puchuncaví

En el año 1993 la zona de Quintero y Puchuncaví fue declarada como saturada de dióxido de azufre y material particulado respirable (PM10).

En el año 2011 ocurre la intoxicación de, alrededor, 40 alumnos de la escuela la Greda con diversos síntomas de intoxicación, lo que en noviembre de ese mismo año se volvió a repetir, registrándose 31 niños y niñas y 9 adultos. A raíz de este suceso, la escuela fue clausurada y reubicada en otro lugar dentro de la comuna. Sin embargo, en

septiembre del 2015, hubo una nueva intoxicación de 40 alumnos del nuevo establecimiento, debiendo ser cerrado.

En el año 2015 se declara zona saturada por material particulado fino PM<sub>2,5</sub>, como concentración anual y latente como concentración diaria, y zona latente por material particulado respirable PM<sub>10</sub>, como concentración anual, a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví a través del D.S. N°10/2015 del MMA.

Luego, en el año 2018 ocurre una crisis ambiental y sanitaria con múltiples intoxicaciones el cual se detalla desde el informe de la Cámara de Diputados de Chile, de la comisión que investigó estos episodios de contaminación. El 20 de agosto del 2018 se inició una serie de situaciones de emergencia que hasta el momento se mantienen sin respuestas claras por parte de la autoridad en cuanto a la imputación certera de responsabilidades. Entre el día lunes 20 y martes 21 de agosto, se registraron cerca de 70 casos de niños, niñas y adolescentes, en su mayoría, que llegaron al hospital Adriana Cousiño de Quintero con síntomas de intoxicación, lo cual provocó la evacuación de diversos colegios ubicados en la comuna de Quintero y la suspensión de las clases para el día 22 y 23 de agosto, tanto para establecimientos educacionales como para jardines infantiles, municipalizados y subvencionados particulares.

Con fecha 23 de agosto la Oficina Nacional de Emergencias del Ministerio del Interior (ONEMI), evacuó informe de incidente o emergencia, por medio del cual comunicó la decisión de declarar alerta amarilla en las comunas de Quintero y Puchuncaví, fundado en el informe técnico N°726 del mismo organismo, en el que se constata la presencia de Metilcloroformo, Nitrobenceno y Tolueno en el ambiente de las comunas de Quintero y Puchuncaví, informando la intoxicación por contaminación atmosférica de 133 personas en la zona. Asimismo, las municipalidades de las comunas afectadas, en coordinación con la Secretaría Regional Ministerial de Educación, determinaron la suspensión de la jornada escolar para el día viernes 24 de agosto, para todos los establecimientos educacionales de la zona.

Tras diez días de paralización de las actividades académicas y ocho días de alerta amarilla, el sábado 1 de septiembre se levantó la alerta que se había declarado en la zona, ordenando la reanudación de clases para el martes 4 de septiembre. Se indicó como fundamento que en los últimos cuatro días había disminuido drásticamente la cantidad de personas intoxicadas y que las mediciones realizadas por los equipos de monitoreo, habían bajado a niveles no riesgosos para la vida y salud de la comunidad.

A pesar de los resultados arrojados por los centros de monitoreo, en el primer día de reanudación de clases, nuevamente se presentaron alrededor de 70 alumnos con síntomas de intoxicación, náuseas, cefaleas y vómitos, constituyéndose en el tercer episodio de intoxicación en menos de dos semanas. Las autoridades, reconocieron que

los instrumentos no detectaron las emanaciones y que ello dificulta la búsqueda de los responsables, al existir más de 15 industrias emplazadas en la zona.

El último episodio descrito, llevó a que el Comité Operativo de Emergencia de la Región de Valparaíso, declarara una nueva alerta amarilla, suspendiendo nuevamente las jornadas escolares, el martes 20 de septiembre se levanta la alerta amarilla.

Posteriormente se plantea que el 24 de septiembre ocurrió un cuarto hecho, después de haber dado término a la alerta amarilla y tras decretar una disminución de las actividades de varias de las empresas sospechosas de causar la crisis sanitaria y se detiene en el efecto de una serie de sustancias. Se decreta Alerta Sanitaria para las comunas de Quintero y Puchuncaví, para enfrentar la emergencia de salud que afectaba a esta zona desde el martes 21 de agosto. Justo cuando se informaban estas medidas, una decena de alumnos de tres establecimientos llegaron hasta el Hospital de Quintero, donde se les diagnosticó “intoxicación por gas”. A partir de la dictación de este decreto se toman las primeras medidas que logran reducir los episodios de contaminación.

El 28 de diciembre como lo dispuso el decreto de Alerta Sanitaria se ingresó a la Contraloría General de la República del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví y la nueva norma de calidad primaria de dióxido de azufre.

Durante el año 2016, según la Intendencia de Valparaíso, se han declarado 62 alertas tempranas con duración de 24 horas, en 2019 se han declarado 44 alertas tempranas de 24 horas. Se ha activado la gestión de episodios críticos (GEC) 141 veces durante el año 2019, se ha decretado 5 alertas (en estación Centro Quintero con una medición de  $604 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 13-09-2019, estación Quintero con una medición de  $533 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 14-09-2019 y otra de  $626 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 14-07-2019, estación Los Maitenes con una medición de  $636 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 04-08-2019 y otra de  $626 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 14-07-2019) 1 pre-emergencia (en estación Quintero con una medición de  $901 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 02-09-2019) y 1 emergencia (en la estación Quintero con una medición de  $1.411 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  el 29-07-2019).

## **CAPÍTULO 2: MARCO NORMATIVO**

## 2. MARCO NORMATIVO

La Constitución Política de Chile data del año 1980, en ella se contiene la primera disposición ambiental de carácter general, ya que antes de eso solo existía normativa sectorial. El artículo 19 n°8 de la Carta Fundamental dice: “El derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación. Es deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la naturaleza. La ley podrá establecer restricciones específicas al ejercicio de determinadas libertades para proteger el medio ambiente”.

Los objetivos que persigue la Ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, según la historia de la Ley contenida en la Biblioteca del Congreso Nacional, son:

1. Darle un contenido concreto y un desarrollo jurídico adecuado a la garantía constitucional que asegura a todas las personas el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación
2. Crear una institucionalidad que permita a nivel nacional solucionar los problemas ambientales existentes y evitar la creación de otros nuevos
3. Crear los instrumentos para una eficiente gestión del problema ambiental, de modo que se pueda dar una adecuada protección de los recursos naturales
4. Disponer un cuerpo legal general, a la cual se pueda referir toda la legislación ambiental sectorial

La ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia crea los Instrumentos de Gestión Ambiental (IGA) para así lograr los objetivos propuestos. En el año 2010 la ley es modificada por la Ley 20.417/2010 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia que crea nuevos IGA y la nueva institucionalidad ambiental del país. Estos instrumentos son:

- Educación e investigación, Evaluación Ambiental Estratégica (EAE)
- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)
- Participación Ciudadana (PAC)
- Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)
- Normas de Calidad
- Normas Emisión
- Planes de Manejo

- Planes de Prevención y/o Descontaminación
- Permisos de Emisión Transable
- Fondo de Protección Ambiental (FPA)

La institucionalidad ambiental se compone del Ministerio de Medio Ambiente (definir políticas y diseño de la regulación), Consejo de Ministros para la Sustentabilidad (aprobar políticas y regulaciones), Servicio de Evaluación Ambiental (administrar el SEIA y proporcionar información de líneas de base), Superintendencia de Medio ambiental (gestionar de un sistema integrado de fiscalización ambiental y sanciones) y el Tribunal Ambiental (a cargo de la justicia ambiental).

## 2.1. **SISTEMA DE INFORMACIÓN NACIONAL DE CALIDAD DEL AIRE** **[14]**

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) del Ministerio de Medio Ambiente pone a su disposición información de calidad de aire de todo el país, buscando mejorar gradualmente el conocimiento, la vigilancia y la gestión de la calidad del aire que respiramos. En este portal se puede encontrar mediciones de calidad del aire en línea, seguimiento histórico de las mediciones de calidad del aire y meteorología, antecedentes de las estaciones de monitoreo, documentación relacionada con calidad de aire y monitoreo y enlaces a sitios Web de interés, nacionales e internacionales.

La información que se presenta en SINCA tiene tres categorías:

- registros no validados: corresponden a la información recibida en línea, de forma automática, desde las estaciones de monitoreo que se encuentren conectadas al sistema
- registros preliminares: corresponden a datos validados en una primera instancia, efectuada por los operadores de la estación donde se corrigen los datos desfasados o se eliminan aquellos que corresponden a fallas o mantenciones como las calibraciones de los instrumentos
- registros oficiales: corresponden a datos validados previamente por los operadores de las estaciones, que pasan por un segundo proceso de validación por algún organismo estatal que tenga competencias sobre los datos.

El portal SINCA es una herramienta cuyo objetivo es contribuir de manera activa a la protección de la salud de la población, promoviendo la difusión de información oportuna y confiable acerca de la calidad del aire.

Los objetivos del monitoreo de calidad del aire son diversos y varían desde la vigilancia de la contaminación atmosférica con fines de protección de la salud de la población hasta el desarrollo de estudios académicos con diversos fines. Sea cual sea el objetivo perseguido, la ausencia de información confiable sobre contaminación atmosférica influye notoriamente sobre una gestión ambiental eficiente y oportuna.

En el caso chileno, históricamente la responsabilidad del monitoreo de calidad de aire ha estado dispersa en una serie de instituciones (Ministerio del Medio Ambiente, Ministerio de Salud, Servicio Agrícola y Ganadero, Comisión Nacional del Medio Ambiente, empresas privadas y otros), lo cual no ha contribuido a realizar una gestión eficiente sobre esta información.

A través de SINCA, el Ministerio del Medio Ambiente impulsa la estandarización de procedimientos asociados al monitoreo y al reporte de información, y promueve la centralización de la información con el objeto de optimizar los recursos disponibles en el país en esta materia. Durante los últimos años, se han desarrollado varias líneas de acción, todas ellas orientadas a mejorar la calidad de la información de monitoreo, destacándose:

1. Elaboración de procedimientos y protocolos para el monitoreo de contaminantes atmosféricos
2. Evaluación a redes de monitoreo a lo largo del país
3. Desarrollo del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA), sustentado en el software Airviro, que permite el manejo de grandes volúmenes de información de todas las redes del país y la conexión a otros sistemas y redes de monitoreo

#### 2.1.1. Red de monitoreo de la calidad del aire

Estas estaciones son instalaciones destinadas a medir y registrar regularmente diversas variables de calidad de aire, entregando información de las concentraciones ambientales de contaminantes atmosféricos actualmente normados en Chile mediante equipos automáticos. Estas mediciones se pueden asociar a los niveles de concentración que originan situaciones de emergencia ambiental, para aquellas estaciones que cuentan con monitoreo en línea.

Además, las estaciones para ser clasificadas como monitoras de calidad del aire deben ser declaradas como estación de monitoreo con representación poblacional (EMRP) y estación de monitoreo con representación poblacional por gases (EMRPG). Sin embargo, existen otras clasificaciones de acuerdo al objetivo de medición, por ejemplo, estación Máximo impacto, estación de cuneta (cerca de calles para emisiones de fuentes móviles).

Existen estaciones de monitoreo públicas y privadas. Las estaciones públicas están a cargo de la administración del MMA desde el año 2012, ya que antes de esa fecha le correspondía esa facultad al Ministerio de Salud. Las estaciones privadas han sido instaladas para el seguimiento y control de las emisiones de contaminantes de proyectos privados, la mayoría de ellas está por exigencias de las resoluciones de calificación ambiental (RCA).

Los contaminantes que se miden son clasificados como contaminantes criterio, se mide material particulado respirable, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, ozono y monóxido de carbono.

Algunas estaciones de monitoreo están equipadas con sensores meteorológicos (esencialmente dirección y velocidad del viento y temperatura para el seguimiento de la calidad del aire y estudios de dispersión de contaminantes atmosféricos).

#### 2.1.1.1 Red de monitoreo de la calidad del aire en Quintero y Puchuncaví

Las estaciones de monitoreo de calidad del aire en línea pertenecientes a la red ubicada en Quintero y Puchuncaví en la región y provincia de Valparaíso, se detallan en la tabla 2-1 y en la figura 2-1. Se indica el nombre de la estación, propietario, operador, comuna, coordenada UTM, inicio de operación y el método que se utiliza para medir SO<sub>2</sub>.

Las estaciones operativas en línea son 9, ya que la estación Campiche (que es la número 10) no toma datos de monitoreo de SO<sub>2</sub> desde el año 2017.

Las mediciones de dióxido de azufre en el aire, según lo establecido en la norma primaria, se realizan mediante los métodos de:

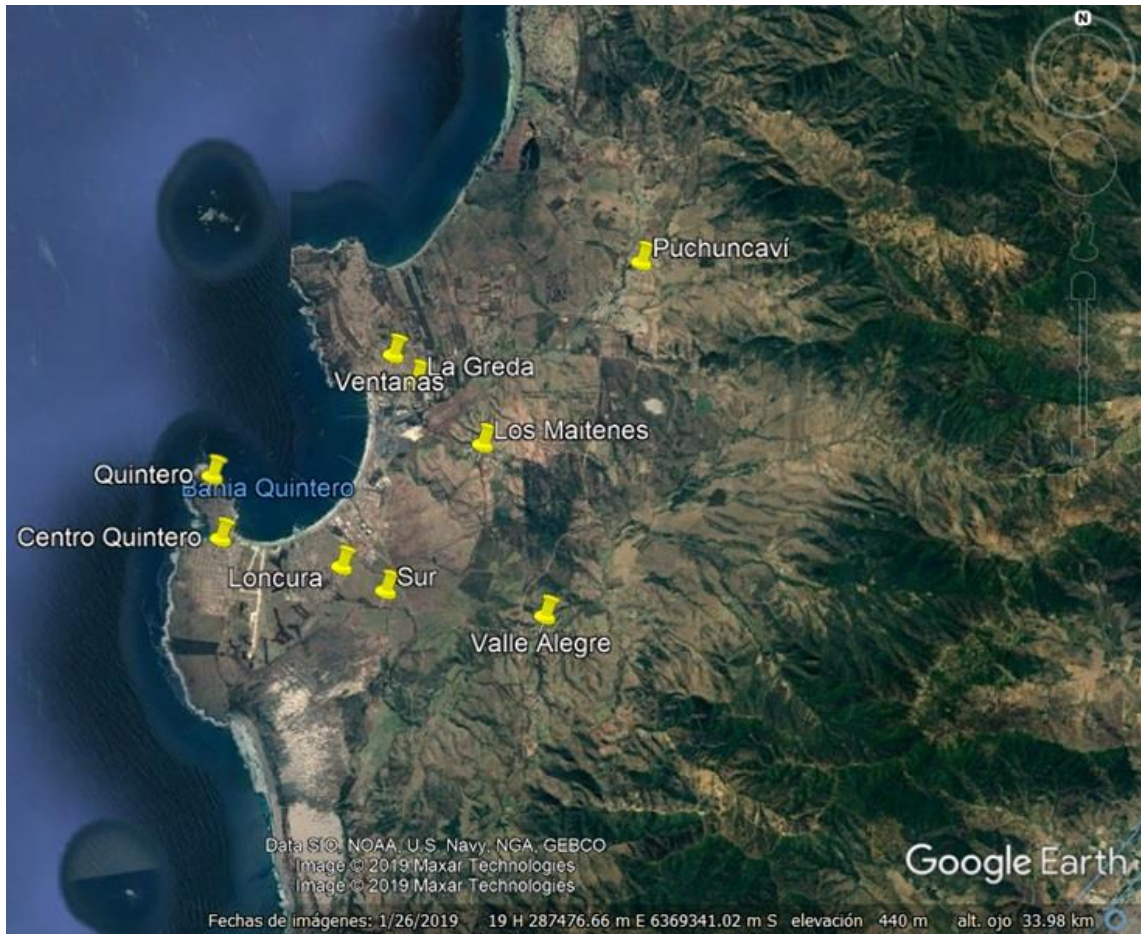
- fluorescencia ultravioleta;
- espectrometría de absorción diferencial con calibración in-situ y,
- un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.

Tabla 2-1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire en Quintero y Puchuncaví

Estación	Propietario	Operador	Comuna	Coordenada UTM	Inicio operación reportada	Técnica para medir SO <sub>2</sub>
Puchuncaví	CODELCO División Ventanas y AES Gener	SGS Chile Ltda.	Puchuncaví	274379 E 6377331 N	01-07-1992	Fluorescencia ultravioleta
La Greda	CODELCO División Ventanas y AES Gener	SGS Chile Ltda.	Puchuncaví	268185 E 6373910 N	01-07-1992	Fluorescencia ultravioleta
Los Maitenes	CODELCO División Ventanas y AES Gener	SGS Chile Ltda.	Puchuncaví	270073 E 6372171 N	01-10-1993	Fluorescencia ultravioleta
Ventanas	CODELCO División Ventanas y AES Gener	SGS Chile Ltda.	Puchuncaví	267547 E 6474609 N	01-01-2013	Fluorescencia de pulso U.V
Centro Quintero	GNL Quintero	SGS Chile Ltda.	Quintero	262853 E 6369407 N	01-03-2008	Fluorescencia ultravioleta
Loncura	ENEL CHILE S.A.	Servicios y Proyectos Ambientales S.A	Quintero	266226 E 6368689 N	01-10-2011	Fluorescencia ultravioleta
Quintero	Codelco División Ventanas	SGS Chile Ltda.	Quintero	262579 E 6371148 N	01-05-2003	Fluorescencia de pulso U.V
Sur	Codelco División Ventanas	SGS Chile Ltda.	Quintero	267461 E 6368037 N	01-10-1993	Fluorescencia ultravioleta
Valle Alegre	CODELCO División Ventanas y AES Gener	SGS Chile Ltda.	Quintero	271889 E 6367413 N	01-07-1992	Fluorescencia ultravioleta

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SINCA

A través de la Resolución N°305 del Ministerio de Salud con fecha 28-01-2004 se declaran las estaciones de Valle Alegre, Los Maitenes, La Greda y Puchuncaví como estaciones de monitoreo de representatividad poblacional de gases para medir y evaluar la norma de calidad primaria de dióxido de azufre. Así mismo, la estación de Centro Quintero a través de la Resolución N°2.877 del Ministerio de Salud con fecha 19-12-2012 también es declarada como estación de monitoreo de representatividad poblacional de gases para medir y evaluar la norma primaria de calidad de dióxido de azufre.



Fuente: Elaboración propia a partir de coordenadas UTM del SINCA

Figura 2-1: Ubicación de estaciones de monitoreo en línea de calidad del aire

## 2.2. NORMATIVA AMBIENTAL

El concepto de normativa de carácter ambiental, o normativa ambiental aplicable, comprende aquellas normas cuyo objetivo es asegurar la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental, e imponen una obligación o exigencia cuyo cumplimiento debe ser acreditado por el titular del proyecto o actividad durante el proceso de evaluación [16].

En base a la ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia sobre las bases generales del medio ambiente, se han dictado las normas de emisión, de calidad (primaria y secundaria) y los planes de prevención y descontaminación, los cuales son instrumentos de gestión ambiental contenidos en la misma.

### 2.2.1. Normas de calidad ambiental

Las normas de calidad ambiental pueden ser primarias o secundarias. Según la ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia la norma primaria de calidad ambiental se define como: aquélla que establece 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; y las normas secundarias de calidad ambiental se definen como: aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza.

Las normas de calidad ambiental referente al aire vigentes son ocho aproximadamente, de las cuales seis son normas primarias de calidad ambiental: D.S. N° 59/1998 modificado por D.S. N° 45/2001, ambos del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la Norma de Calidad Primaria para MP10; D.S. N°115/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la Norma de Calidad Primaria de Aire para Monóxido de Carbono (CO); D.S. N°136/2000 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la Norma de Calidad Primaria para Plomo en el Aire; D.S. N° 114/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la Norma de Calidad Primaria de Aire para Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>); D.S. N° 112/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia establece la Norma de Calidad Primaria de Aire para Ozono (O<sub>3</sub>) y el D.S. N° 104/2018 del Ministerio del Medio Ambiente establece la Norma de Calidad Primaria de Aire para Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>). Dos de ellas son normas secundarias de calidad ambiental: el D.S. N° 185/1991 del Ministerio de Minería Reglamenta funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el territorio de la República y D.S. N° 4/1992 del Ministerio de Agricultura y Subsecretaría de Agricultura establece las Normas de calidad del aire para material particulado sedimentable en la cuenca del río Huasco III región.

#### 2.2.1.1 Norma de calidad primaria de aire para dióxido de azufre

La normativa de calidad primaria de aire para dióxido de azufre data del año 2002 con el D.S. N°113 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Como se

establece en la ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia las normas deben ser revisadas en un periodo de 5 años. Es por eso que en el año 2010 entra en revisión dicha norma y en el año 2015 se genera el anteproyecto de la actualización de la normativa. En el año 2018 se publica como el D.S. N°104 del MMA.

Cabe destacar que los niveles de la guía de calidad de aire (GCA) de la OMS establece dos objetivos intermedios y el valor de GCA para SO<sub>2</sub>. No fija niveles intermedios para el periodo de promedio 10 minutos debido a los efectos que este contaminante puede causar en las personas (tabla 2-2). Adicionalmente, la EPA presenta una norma diaria de 366 µg/m<sup>3</sup> y anual de 78 µg/m<sup>3</sup>.

Tabla 2-2: Guía de calidad de aire de la OMS para SO<sub>2</sub>

<b>niveles OMS</b>	<b>promedio 24 horas</b>	<b>promedio 10 minutos</b>
OI-1	125 µg/m <sup>3</sup>	-
OI-2	50 µg/m <sup>3</sup>	-
GCA	20 µg/m <sup>3</sup>	500 µg/m <sup>3</sup>

Fuente: Guía de calidad del aire de la OMS relativas al PM, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, actualización mundial 2005

Esta actualización considera actualización en los valores anuales y diarios establecidos como valor de calidad de aire para SO<sub>2</sub>, se incorpora un valor horario de calidad. Además, se actualizan los valores establecidos para los niveles de emergencia ambiental para SO<sub>2</sub>. En las tablas 2-3 y 2-4 se pueden apreciar los principales cambios.

Tabla 2-3: Actualización valor anual, 24 horas y horario de la norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub>

<b>Periodo</b>	<b>D.S. N°113/2002</b>	<b>D.S. N°104/2018</b>
anual	80 µg/m <sup>3</sup> N	60 µg/m <sup>3</sup> N
24 horas	250 µg/m <sup>3</sup> N	150 µg/m <sup>3</sup> N
horario	no existe	350 µg/m <sup>3</sup> N

Fuente: Elaboración propia a partir de D.S. N°113/2002 y D.S. N°104/2018

Tabla 2-4: Actualización episodios de emergencia ambiental de la norma de calidad primaria de SO<sub>2</sub>

<b>Niveles de emergencias</b>	<b>D.S. N°113/2002</b>	<b>D.S. N°104/2018</b>
alerta	1.962-2.615 µg/m <sup>3</sup> N	500-649 µg/m <sup>3</sup> N
pre-emergencia	2.616-3.923 µg/m <sup>3</sup> N	650-949 µg/m <sup>3</sup> N
emergencia	≥ 3.924 µg/m <sup>3</sup> N	≥ 950 µg/m <sup>3</sup> N

Fuente: Elaboración propia a partir de D.S. N°113/2002 y D.S. N°104/2018

El D.S. N°104/2018 del MMA tiene como objetivo proteger la salud de las personas de los efectos agudos y crónicos generados por la exposición a dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire.

Para conocer la calidad del aire se define el concepto de valores del índice de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre, expresados en µg/m<sup>3</sup>N y ppbv por hora, se define como “indicador cualitativo que sirve para calificar la calidad del aire con respecto al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)” (D.S. N°104/2018 del MMA) y tiene como propósito informar a la población de manera clara, oportuna y continua, sobre los niveles de contaminación atmosférica, los probables daños a la salud que ocasiona y las medidas de protección que pueden tomar. En la tabla 2-5 se detallan estos niveles y sus respectivas concentraciones, ya sea en µg/m<sup>3</sup>N y ppbv.

Tabla 2-5: Índices de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre

<b>ICAGSO<sub>2</sub></b>	<b>Concentración de 1 hora de dióxido de azufre µg/m<sup>3</sup>N</b>	<b>Concentración de 1 hora de dióxido de azufre (ppbv)</b>
0 – 99	0 – 349	0 – 133
100 – 199	350 – 499	134 – 190
200 – 299	500 – 649	191 – 247
300 – 399	650 – 799	248 – 305
400 – 499	800 – 949	306 – 362
500	950	363

Fuente: D.S. N°104/2018

Establece la norma primaria de calidad para dióxido de azufre, como norma anual se tiene un valor de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  o 23 ppbv y se considerará sobrepasada cuando:

- el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores de concentración anual, fuere mayor o igual al valor de la norma que se establece
- si en un año calendario, el valor de la concentración anual, fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece [17]

La norma de 24 horas tiene un valor de  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  o 57 ppbv y se considerará sobrepasada cuando:

- el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores del percentil 99 de las concentraciones de 24 horas registradas cada año, fuere mayor o igual al valor de la norma que se establece
- si en un año calendario, el valor correspondiente al percentil 99 de las concentraciones de 24 horas registradas, fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece [17]

La norma horaria tiene un valor de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  o 134 ppbv y se considerará sobrepasada cuando:

- el promedio aritmético de tres años calendario sucesivos de los valores del percentil 98,5 de las concentraciones de 1 hora registradas cada año, fuere mayor o igual al valor de la norma que se establece. A partir del cuarto año calendario de publicada la norma en el Diario Oficial, se considera un percentil 99 para evaluar esta condición
- si en un año calendario, el valor correspondiente al percentil 98,5 de las concentraciones de 1 hora registradas, fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece. A partir del cuarto año calendario de publicada la norma en el Diario Oficial, se considera un percentil 99 para evaluar esta condición

En este decreto también se establecen los niveles que originan situaciones de emergencia ambiental (tabla 2-6).

Tabla 2-6: Niveles de emergencia ambiental para dióxido de azufre

Nivel		Niveles de emergencia expresados como concentración de 1 hora de dióxido de azufre en $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (en ppbv)
1	Alerta	500 – 649 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (191 – 247 ppbv)
2	Preemergencia	650 – 949 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ (248 – 362 ppbv)
3	Emergencia	950 $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ o superior (363 ppbv o superior)

Fuente: D.S. N°104/2018

### 2.2.2. Planes de prevención y descontaminación atmosférica

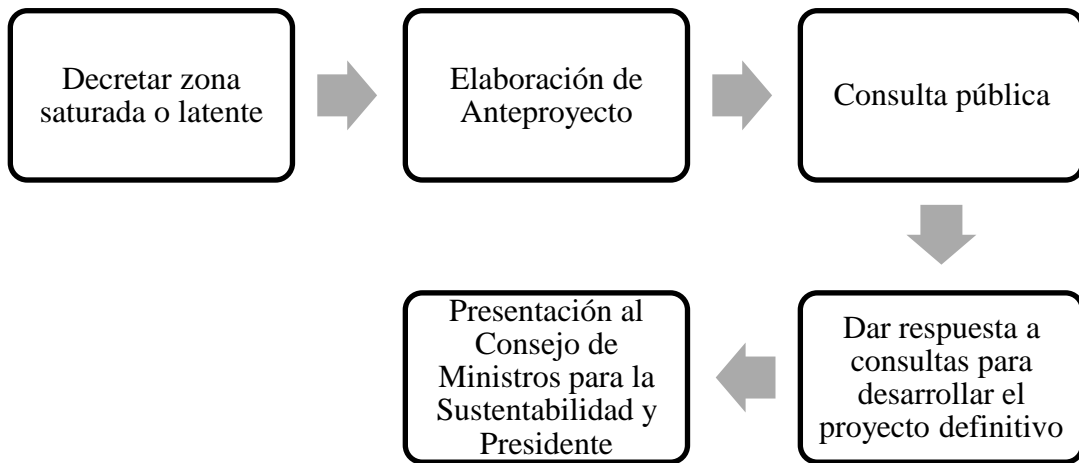
Los Planes de Prevención y/o de Descontaminación Atmosférica (PPDA) contemplan una serie de medidas de control, cuya finalidad es recuperar los niveles establecidos en las Norma de Calidad ambiental que correspondan [18].

Para que se establezca un plan de prevención y/o descontaminación se tiene que contar con dos cosas fundamentales, primero, una norma de calidad ambiental y, segundo, que la zona sea declarada como latente o saturada (mediante decreto supremo) del parámetro contenido en la norma de calidad ambiental. Una zona latente se define, según la ley 19.300/1994 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, como aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental; y la zona saturada como aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasadas. Su elaboración y proposición le corresponde al MMA y, como se ilustra en la figura 2-2.

Según el artículo 45 de la ley 19.300/1994 los planes de prevención y descontaminación contendrán, a lo menos:

- La relación que exista los entre niveles de emisión totales y los niveles de contaminantes a ser regulados;
- El plazo en que se espera alcanzar la reducción de emisiones materia del plan;
- La indicación de los responsables de su cumplimiento;
- La identificación de las autoridades a cargo de su fiscalización;
- Los instrumentos de gestión ambiental que se usarán para cumplir sus objetivos;
- La proporción en que deberán reducir sus emisiones las actividades responsables de la emisión de los contaminantes a que se refiere el plan, la que deberá ser igual para todas ellas;

- La estimación de sus costos económicos y sociales, y
- La proposición, cuando sea posible, de mecanismos de compensación de emisiones [3]



Fuente: Elaboración propia a partir de Guía de Calidad del Aire, MMA 2016

Figura 2-2: Elaboración de un plan de prevención y/o descontaminación

Las actividades contaminantes ubicadas en zonas afectas a planes de prevención o descontaminación, quedarán obligadas a reducir sus emisiones a niveles que permitan cumplir los objetivos del plan en el plazo que al efecto se establezca.

En el artículo 47 contempla que los planes de prevención o descontaminación podrán utilizar, según corresponda, los siguientes instrumentos de regulación o de carácter económico:

- a) Normas de emisión;
- b) Permisos de emisión transables;
- c) Impuestos a las emisiones o tarifas a los usuarios, en los que se considerará el costo ambiental implícito en la producción o uso de ciertos bienes o servicios, y
- d) Otros instrumentos de estímulo a acciones de mejoramiento y reparación ambientales [3]

Desde el año 1992 se han establecido 23 planes de prevención y/o descontaminación, de los cuales uno corresponde a la zona del Puerto de Ventanas (1992) y otro a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (2018).

#### 2.2.2.1. Gestión de episodios críticos de contaminación [5]

Un episodio crítico de contaminación del aire se declara cuando se superan los valores que estén establecidos en la respectiva norma de calidad primaria del aire. Estas normas definen los niveles de concentraciones que dan origen a episodios críticos (niveles de alerta, preemergencia y emergencia ambiental).

Para simplificar el concepto de episodio crítico, se utiliza el ICAP (Índice de Calidad del Aire por Partículas), que lleva a una escala estándar el valor promedio de las concentraciones de los PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>, de acuerdo a lo que establece la norma para cada contaminante.

Los episodios críticos se decretan mediante un modelo estadístico de pronóstico diario, cuando la calidad del aire y las condiciones atmosféricas de ventilación son desfavorables y pueden significar una exposición de las personas a altos índices de contaminación respecto de las normas de calidad del aire.

Respecto del procedimiento establecido para la declaración de episodios críticos, la zona afectada debe contar con un Plan de descontaminación atmosférica (PDA) o PPDA, que permita implementar una Gestión de Episodios Críticos o GEC.

Con la entrada en vigencia de los nuevos planes de descontaminación, además de los ya vigentes, durante el año 2016 hubo GEC con aplicación de medidas de contingencia asociadas al PM<sub>10</sub> y al PM<sub>2,5</sub> en el Valle Central de la región de O'Higgins (PM<sub>10</sub>), Talca – Maule (PM<sub>10</sub>), Chillán y Chillán Viejo (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), Temuco y Padre Las Casas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), Osorno (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), Coyhaique y su zona circundante (PM<sub>10</sub>) y en la Región Metropolitana (PM<sub>10</sub>).

Complementariamente, desde el año 2015, se comenzó a utilizar el instrumento de Alerta Sanitaria del Ministerio de Salud, que ha permitido aplicar medidas de contingencia por PM<sub>2,5</sub> a aquellas ciudades que fueron declaradas saturadas por el Ministerio del Medio Ambiente y que se encuentran en proceso de elaboración de sus PDA.

#### 2.2.2.2. Plan de descontaminación atmosférica en Quintero y Puchuncaví

En las zonas de Quintero y Puchuncaví se ha declarado zona latente de contaminantes atmosféricos en el D.S. N°346/1993 del Ministerio de Agricultura declara zona saturada por anhídrido sulfuroso y material particulado al área circundante al complejo industrial Ventanas, V región; y D.S. N°10/2015 del MMA declara zona saturada por material particulado fino PM<sub>2,5</sub>, como concentración anual y latente como

concentración diaria, y zona latente por material particulado respirable PM<sub>10</sub>, como concentración anual, a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.

El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví publicado en el año 2019 (D.S. N°105/2018 del Ministerio de Medio Ambiente), establece una serie de medidas para las principales fuentes de emisión identificadas en la zona.

Se realiza un inventario de emisiones, entre otras cosas, para caracterizar las fuentes que aportan mayor cantidad de contaminantes en esas zonas. En la figura 2-3 y tabla 2-7 se observa que las empresas ENAP, CODELCO y AES GENER S.A. son las que mayoritariamente componen las emisiones de MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>. En las emisiones de SO<sub>2</sub> CODELCO Ventanas es el principal emisor de este contaminante con un 61,8% (lo que equivale a 12.852 ton/año), seguido de un 30,1% (equivale a 6.253 ton/año) para AES GENER S.A. y un 7,2% ENAP Refinería Aconcagua (equivale a 1.492 ton/año).

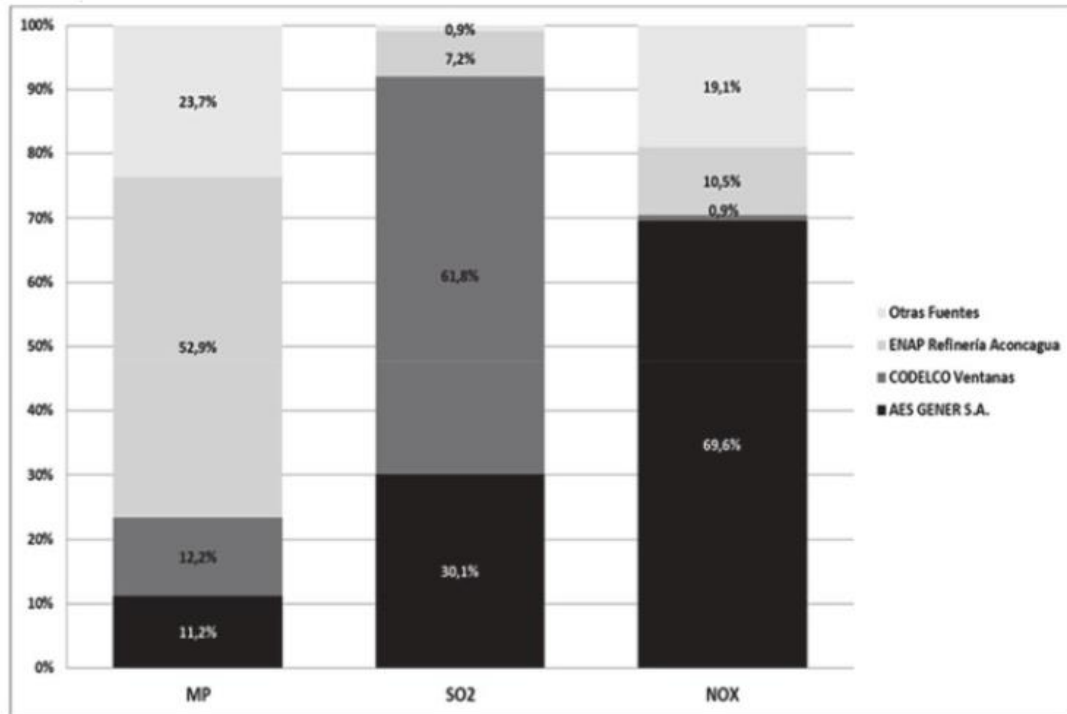
Tabla 2-7: Emisiones zona Quintero, Puchuncaví y Concón años 2015-2017

Tipo	FUENTE	EMISIONES (ton/año)			
		MP	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	
<b>Puntual</b>	AES GENER (*)	195	6.253	7.770	
	CODELCO DIVISIÓN VENTANAS	211	12.852	97	
	(*)				
	ENAP (*)	918	1.492	1.169	
	Otras puntuales (D.S.138)	255	178	977	
	<b>Sub total</b>	<b>1.579</b>	<b>20.775</b>	<b>10.013</b>	
<b>Areal</b>	Urbana Puchuncaví (**)	21	-	3	
	Urbana Quintero (**)	19	-	4	
	Urbana Concón (**)	25	-	8	
	Transporte Puchuncaví	10	2	366	
	Transporte Quintero	4	1	152	
	Transporte Concón	22	5	620	
	Acopios de CODELCO	27	-	-	
	Acopios de AES GENER	6	-	-	
	Acopios Puerto Ventanas	12	-	-	
	Acopio Planta Cementera	1	-	-	
	Planta de Áridos	9	-	-	
		<b>Sub total</b>	<b>156</b>	<b>8</b>	<b>1.153</b>
		<b>TOTAL EMISIONES (ton/año)</b>	<b>1.735</b>	<b>20.783</b>	<b>11.166</b>

(\*) Emisiones reales promedio 2015-2017.

(\*\*) Las emisiones asociadas a las fuentes urbanas, corresponden tanto a las emisiones de los sectores residencial y comercial por combustión para calefacción como a las emisiones evaporativas de estos mismos sectores.

Fuente: D.S. N°105/2018



Fuente: D.S. N°105/2018

Figura 2-3: Emisiones porcentual zona Quintero, Puchuncaví y Concón

La población beneficiada por este Plan es de 92.621 habitantes (Censo 2017). Las principales medidas adoptadas por este plan son control de emisiones Calderas industriales (PM, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), control de emisiones Codelco División Ventanas (MP y SO<sub>2</sub>), control de emisiones Complejo Termoelectrico Ventanas de AES Gener S.A (MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), control de emisiones a ENAP Refinerías Aconcagua (MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>), control de emisiones de MP en Fuentes Areales (Áridos y gránulos sólidos), control de emisiones de COV (procesamiento y almacenamiento de Hidrocarburos), control de emisiones en quemas agrícolas, forestales y calefacción domiciliaria, compensación de emisiones, gestión de episodios críticos, seguimiento y vigilancia de la calidad del aire y difusión y educación ambiental [19].

## **CAPÍTULO 3: RESULTADOS**

### 3. **RESULTADOS**

#### 3.1. **METODOLOGÍA**

##### 3.1.1. Descripción

La variable que se busca medir es la concentración dióxido de azufre horario en el aire en las comunas de Quintero y Puchuncaví en las diversas estaciones de monitoreo en línea de la calidad del aire para compararlos con el D.S. N°104/2018 del MMA.

Este trabajo tiene el objetivo de conocer la calidad del aire referente al valor horario de dióxido de azufre del D.S. N°104/2018 del MMA de las comunas de Quintero y Puchuncaví. Para conocer la calidad del aire se utiliza el índice de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre (ICAGSO<sub>2</sub>), así se puede saber si se han generado estados de emergencia ambiental, y se evalúa de forma preliminar el cumplimiento de la norma de calidad horaria para dióxido de azufre. Los índices de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre están ilustrados en la tabla 2-3 y los estados de emergencia ambiental en la tabla 2-4. El valor establecido como norma horaria de calidad para el dióxido de azufre es de 350 µg/m<sup>3</sup>N.

##### 3.1.2. Tipo de investigación [20]

Este es un trabajo descriptivo de enfoque cuantitativo basado en la metodología de Hernández, Fernández y Baptista (2010), ya que se recolectan datos sobre la concentración horaria de dióxido de azufre de las estaciones de monitoreo en línea de calidad del aire para su posterior análisis.

Una investigación descriptiva busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población. Son útiles para mostrar con precisión los ángulos o dimensiones de un fenómeno, suceso, comunidad, contexto o situación [20].

##### 3.1.3. Hipótesis

Las hipótesis de investigación son:

- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): la concentración horaria de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo en línea de la calidad del aire es distinta del valor establecido en la norma horaria del D.S. N°104/2018 del MMA.
- Hipótesis nula ( $H_0$ ): la concentración horaria de dióxido de azufre en las estaciones de monitoreo en línea de la calidad del aire es igual al valor establecido en la norma horaria del D.S. N°104/2018 del MMA.

#### 3.1.4 Diseño de la investigación

Este trabajo utiliza la metodología de una investigación no experimental cuantitativa transeccional descriptiva de Hernández, Fernández y Baptista (2010).

Es una investigación no experimental cuantitativa, ya que es un estudio que no realiza la manipulación deliberada de las variables y solo se observan fenómenos en su ambiente natural para posteriormente ser analizados. Las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, ya que no se tiene control directo sobre ellas porque ya sucedieron al igual que sus efectos.

Es transeccional, porque se recopilan datos de un momento único con el propósito de describir las variables y analizar su incidencia en un momento dado.

Es descriptivo, ya que se indagan las incidencias de una o más variables de una población.

#### 3.1.5 Datos

Los datos son el promedio horario de la concentración de dióxido de azufre expresada en  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  de las estaciones de monitoreo en línea de la calidad del aire entre el 01-01-2016 y el 21 30-09-2019 de las estaciones de Puchuncaví, La Greda, Los Maitenes, Ventanas, Centro Quintero, Loncura, Quintero, Sur y Valle Alegre.

#### 3.1.6 Fuente de datos

Los datos son de una fuente secundaria, se recopilan del Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire.

#### 3.1.7 Análisis de los datos

Los datos son evaluados con un test de normalidad, para ver si se ajustan a esta distribución utilizando la prueba de Anderson – Darling, Kolmogorov – Smirnov,

Levene (para homocedasticidad). Luego, hay dos posibilidades, que sean normales o no, si no son normales se transforman a logaritmo, raíz cuadrada y el inverso multiplicativo, se realiza nuevamente los test de normalidad. Si resulta que los datos no se distribuyen de forma normal, se utiliza estadística descriptiva (en donde se calcula el promedio, error estándar de la media, desviación estándar, varianza, mínimo, máximo, cuartil 1, mediana, cuartil 3, máximo, rango, asimetría y curtosis), series temporales (para ilustrar la superación del nivel de dióxido de azufre), prueba de valores atípicos y el posterior análisis de los datos.

Además, se realizan gráficos lineales de la mediana en años/mes y años/hora en cada una de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, para así conocer el comportamiento estacional y horario del dióxido de azufre.

Para evaluar el cumplimiento preliminar de la norma de calidad de dióxido de azufre para un año calendario, se utiliza el percentil 98,5 de las concentraciones horarias registradas, si este fuere mayor o igual al doble del valor de la norma que se establece. A partir del cuarto año calendario de publicada la norma en el diario oficial, se considera un percentil 99 para evaluar esta condición [20].

Para conocer el estado de la calidad del aire se clasifican las mediciones horarias de dióxido de azufre de los años 2016, 2017, 2018 y 2019 en los rangos del ICAGSO<sub>2</sub> (tabla 2-5) y se realiza un conteo de las mediciones. Para conocer los episodios de emergencia ambiental se utiliza el ICAGSO<sub>2</sub>, estos episodios son alcanzados cuando el valor del ICAGSO<sub>2</sub> es igual o mayor a 200, es decir, cuando la concentración de SO<sub>2</sub> es mayor o igual a 500 µg/m<sup>3</sup>N o 191 ppbv.

## 3.2. EXPRESIÓN DE CÁLCULO

### 3.2.1. Prueba de Anderson – Darling

$$A^2 = -N - \frac{1}{N} \sum (2I - 1)(\ln(1 - F(Y_{N+1})))$$

$F(Y_i)$ :  $\Phi \frac{Y_i - \bar{x}}{s}$ , que es la función de distribución acumulada de la distribución normal estándar

$Y_i$ : datos ordenados

### 3.2.2. Prueba de Kolmogorov – Smirnov

$$D = \text{máx.} \{D^+, D^-\}$$

$D^+$ :  $\text{máx.} \{i / n - Z_{(i)}\}$

$D^-$ :  $\text{máx.} \{Z_{(i)} - (i - 1) / n\}$

$Z$ :  $F(X_{(i)})$

$F(x)$ : función de distribución de probabilidad de la distribución normal

$X_{(i)}$ : estadísticos de  $i^{\text{ésimo}}$  orden de una muestra aleatoria,  $1 \leq i \leq n$

$n$ : tamaño de la muestra

### 3.2.3. Prueba de Grubbs para valores atípicos

Si se evalúa el valor de datos más grande es un valor atípico, entonces  $G$  viene dado por:

$$G = \frac{Y_n - \bar{y}}{s}$$

$\bar{y}$ : la media de la muestra

$s$ : la desviación estándar de la muestra

$n$ : el número de observaciones en la muestra

### 3.2.4. Percentil [20]

Corresponde a una medida estadística que da cuenta de la posición de un valor ( $X_k$ ) respecto al total de una muestra ( $X_1, \dots, X_n$ ). Para calcular el percentil, en cada estación de monitoreo se anotarán todos los valores de las concentraciones de dióxido de azufre en una lista ordenada en forma creciente:  $X_1 \leq X_2 \leq X_3 \leq \dots X_k \leq X_{n-1} \leq X_n$ .

El percentil  $k$  será el valor del elemento de orden " $k$ ", donde " $k$ " se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$k = q * n$$

$q$ : 0,985 (para periodo anual) y  $q$ : 0,99 (para un periodo de 3 años)

$n$ : corresponde al número total de datos de la lista ordenada

$k$ : se aproximará al número entero más próximo

### 3.3. TEST DE NORMALIDAD

#### 3.3.1. Prueba de Anderson – Darling y Kolmogorov – Smirnov

Las hipótesis y el nivel de significancia para las pruebas de normalidad son:

- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): la variable registros de mediciones de  $SO_2$  en la muestra que es diferente a una distribución normal
- Hipótesis nula ( $H_0$ ): la variable registros de mediciones de  $SO_2$  en la muestra que es igual a una distribución normal
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

Tabla 3-1: Prueba normalidad Anderson – Darling (AD) y Kolmogorov – Smirnov (KS)

<b>Estación de monitoreo</b>	<b>media</b>	<b>desv. est.</b>	<b>N</b>	<b>AD</b>	<b>valor p</b>	<b>KS</b>	<b>valor p</b>
Puchuncaví	14,72	20,33	32530	4728,09	<0,005	0,281	<0,010
Ventanas	15,11	28,30	32380	5676,53	<0,005	0,300	<0,010
Los Maitenes	27,51	60,17	32456	6450,40	<0,005	0,324	<0,010
La Greda	14,98	23,81	32479	5273,53	<0,005	0,276	<0,010
Quintero	28,38	70,68	32467	7109,66	<0,005	0,344	<0,010
Centro Quintero	22,76	44,16	32167	5712,04	<0,005	0,303	<0,010
Loncura	16,97	57,67	28519	7670,79	<0,005	0,384	<0,010
Sur	21,25	37,89	32268	5112,46	<0,005	0,288	<0,010
Valle Alegre	14,05	21,59	31400	4680,95	<0,005	0,263	<0,010

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

#### 3.3.2. Prueba de homocedasticidad

Las hipótesis y el nivel de significancia para la prueba de homocedasticidad es:

- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): las varianzas de la variable registros de mediciones de  $SO_2$  no es homogénea para cada estación de monitoreo
- Hipótesis nula ( $H_0$ ): las varianzas de la variable registros de mediciones de  $SO_2$  es homogénea para cada estación de monitoreo
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$

Tabla 3-2: Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

<b>Estación</b>	<b>N</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>IC</b>
Centro Quintero	32167	44,1556	(41,4614; 47,0289)
La Greda	32479	23,8074	(21,8873; 25,8981)
Loncura	28519	57,6687	(53,2277; 62,4854)
Los Maitenes	32456	60,1688	(56,9971; 63,5223)
Puchuncaví	32530	20,3259	(19,5355; 21,1500)
Quintero	32467	70,6760	(66,1143; 75,5588)
Sur	32268	37,8949	(35,4718; 40,4869)
Valle Alegre	31400	21,5859	(20,4485; 22,7884)
Ventanas	32380	28,2987	(21,1618; 37,8456)

\* Nivel de confianza individual = 99,4444%

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

Tabla 3-3: Resultado prueba homogeneidad de varianza

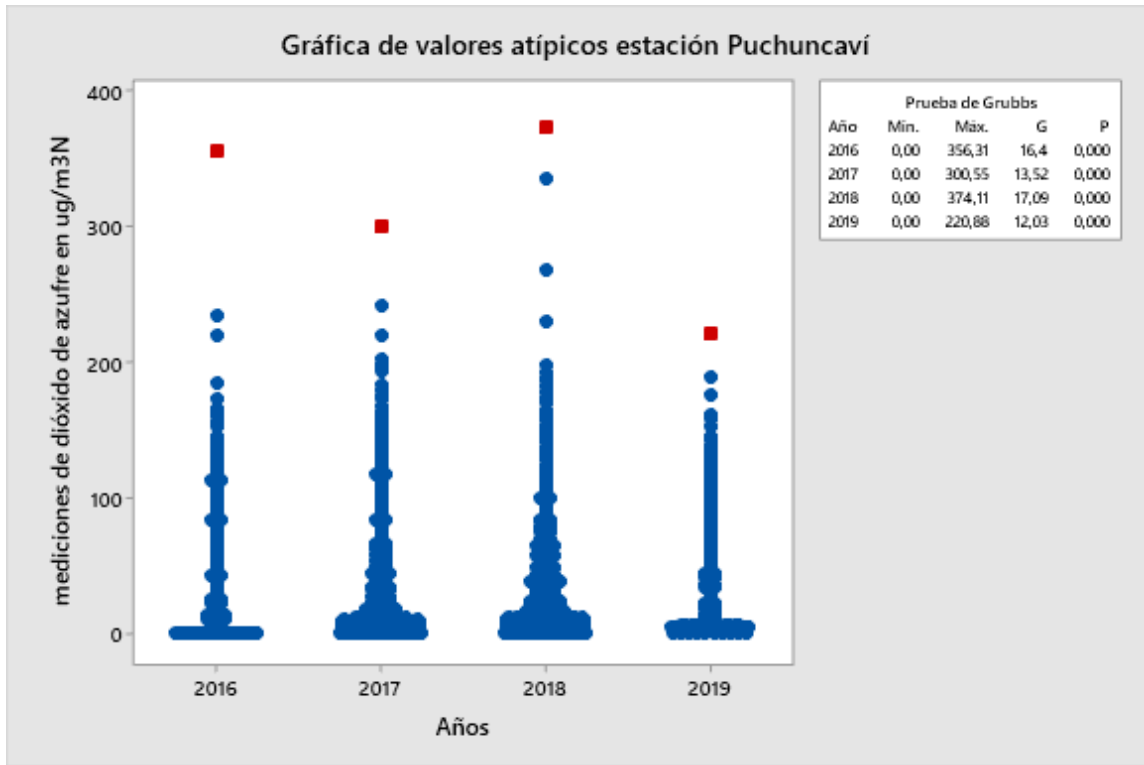
<b>Método</b>	<b>Estadística de prueba</b>	<b>Valor p</b>
Comparaciones múltiples	—	0,000
Levene	549,06	0,000

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

### 3.4. PRUEBA DE GRUBBS PARA VALORES ATÍPICOS

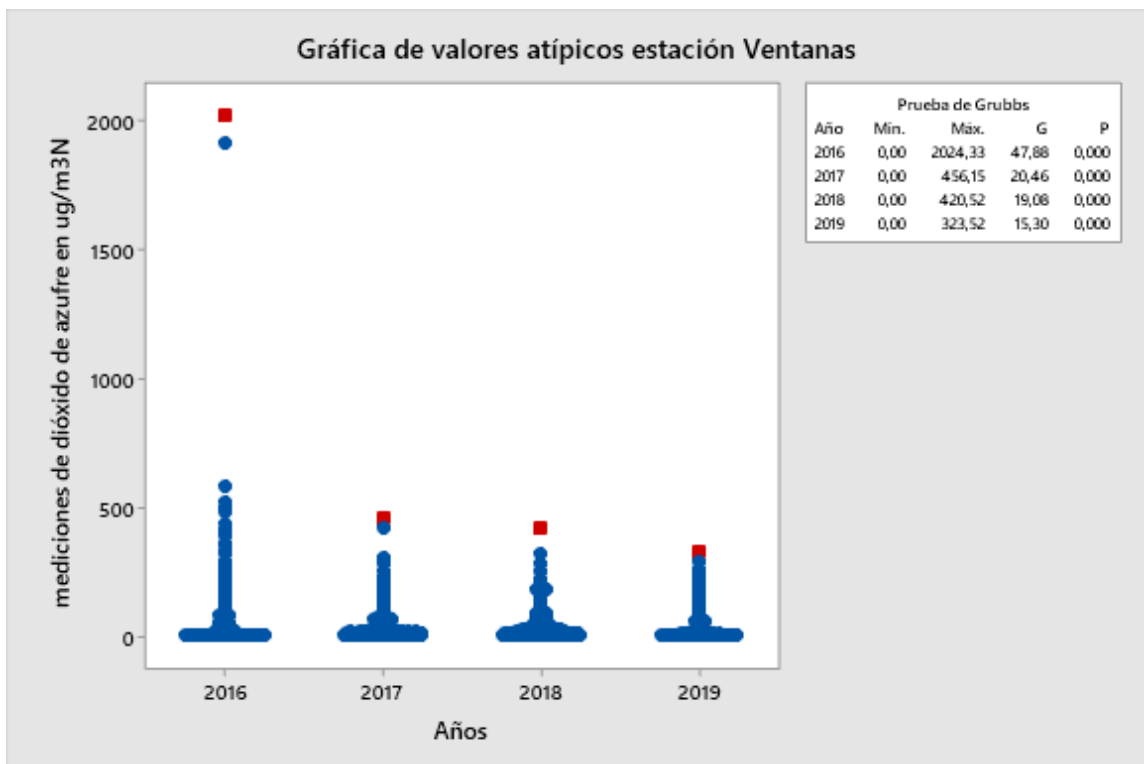
Las hipótesis formuladas y el nivel de significancia para esta prueba son:

- Hipótesis alternativa ( $H_1$ ): el valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico
- Hipótesis nula ( $H_0$ ): todos los valores de los datos provienen de la misma población normal
- Nivel de significancia  $\alpha = 0,05$



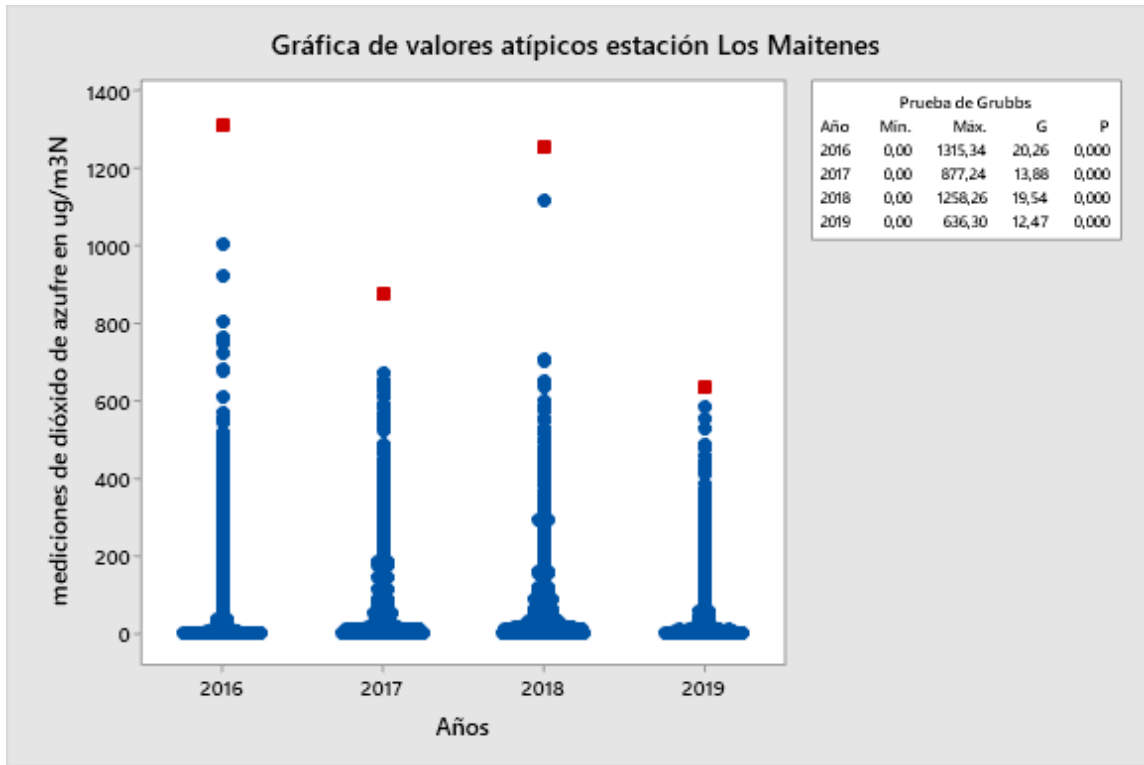
Gráfica 3-1: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Puchuncaví

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



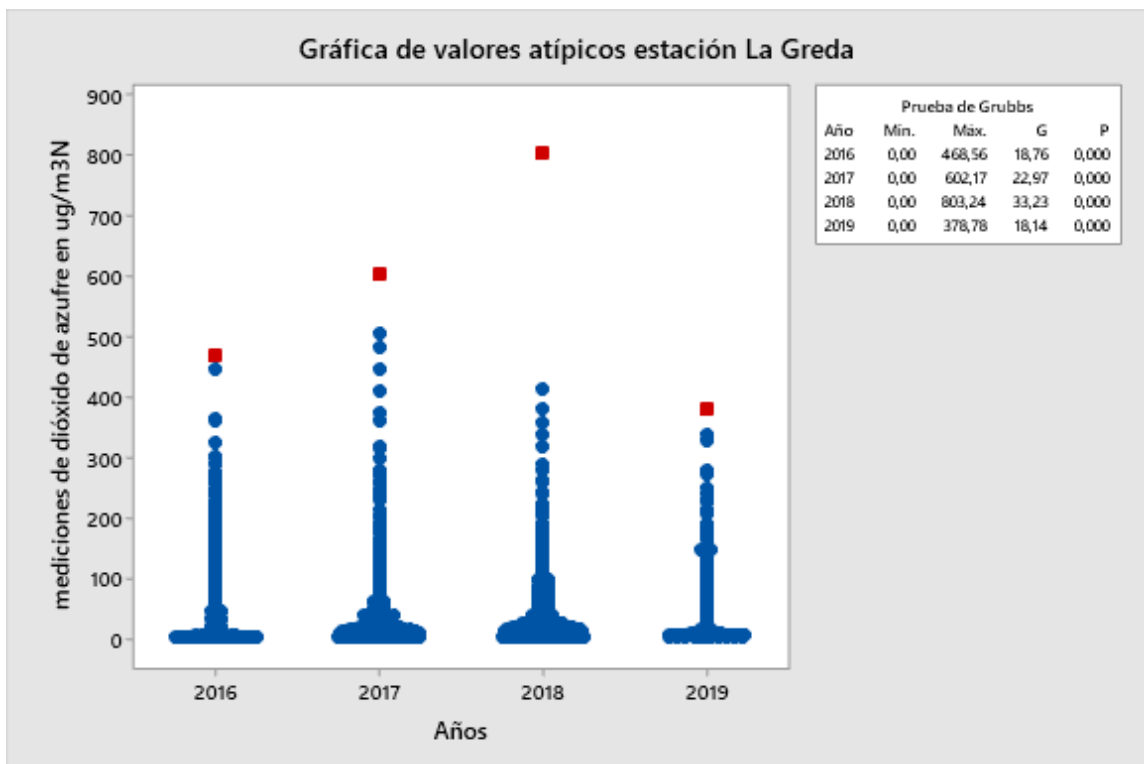
Gráfica 3-2: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Ventanas

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



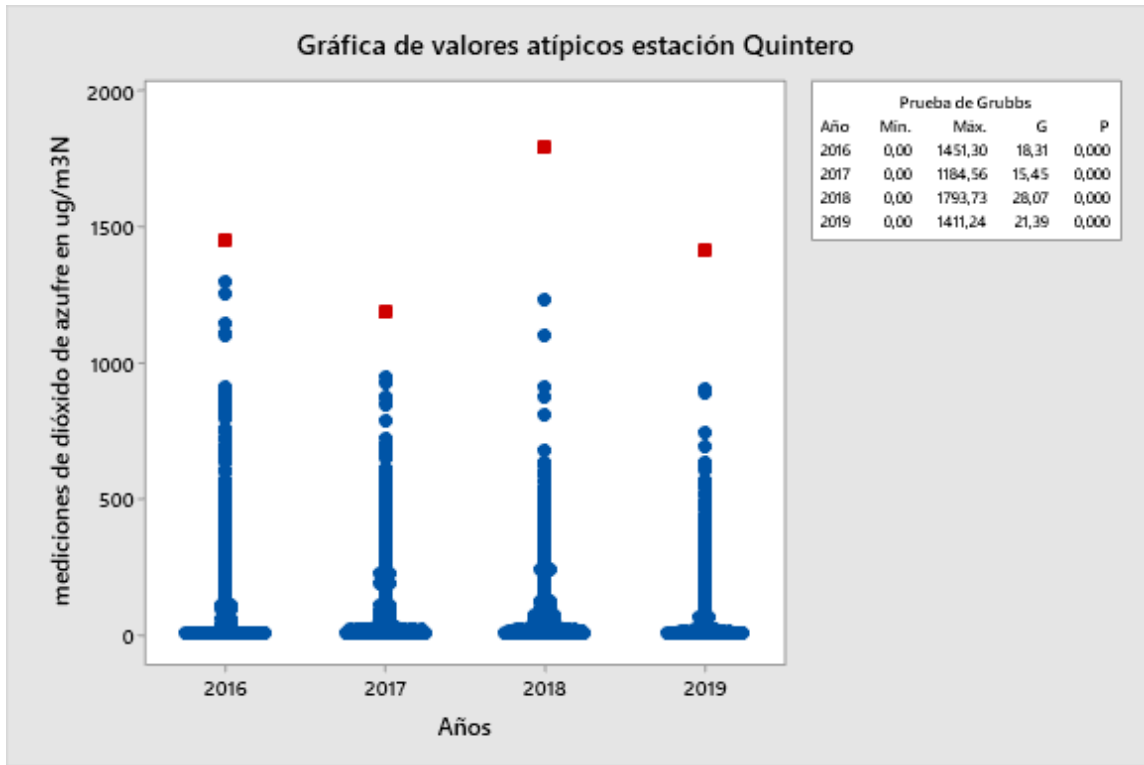
Gráfica 3-3: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Los Maitenes

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



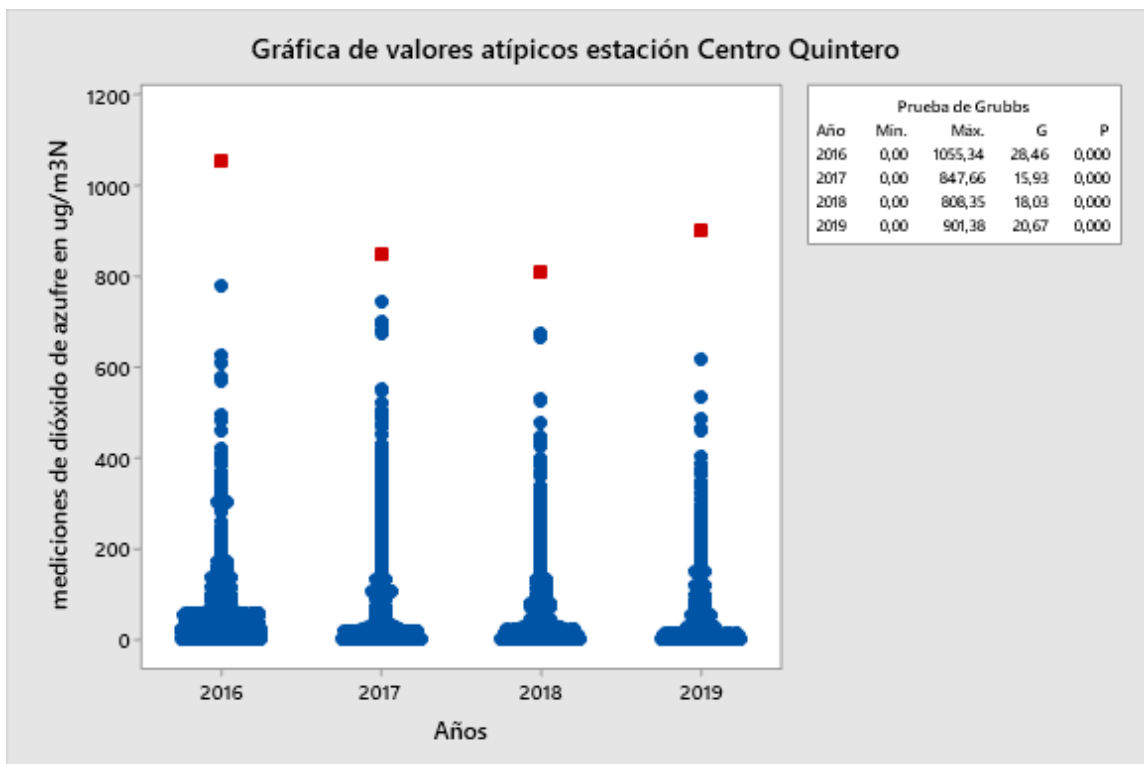
Gráfica 3-4: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación La Greda

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



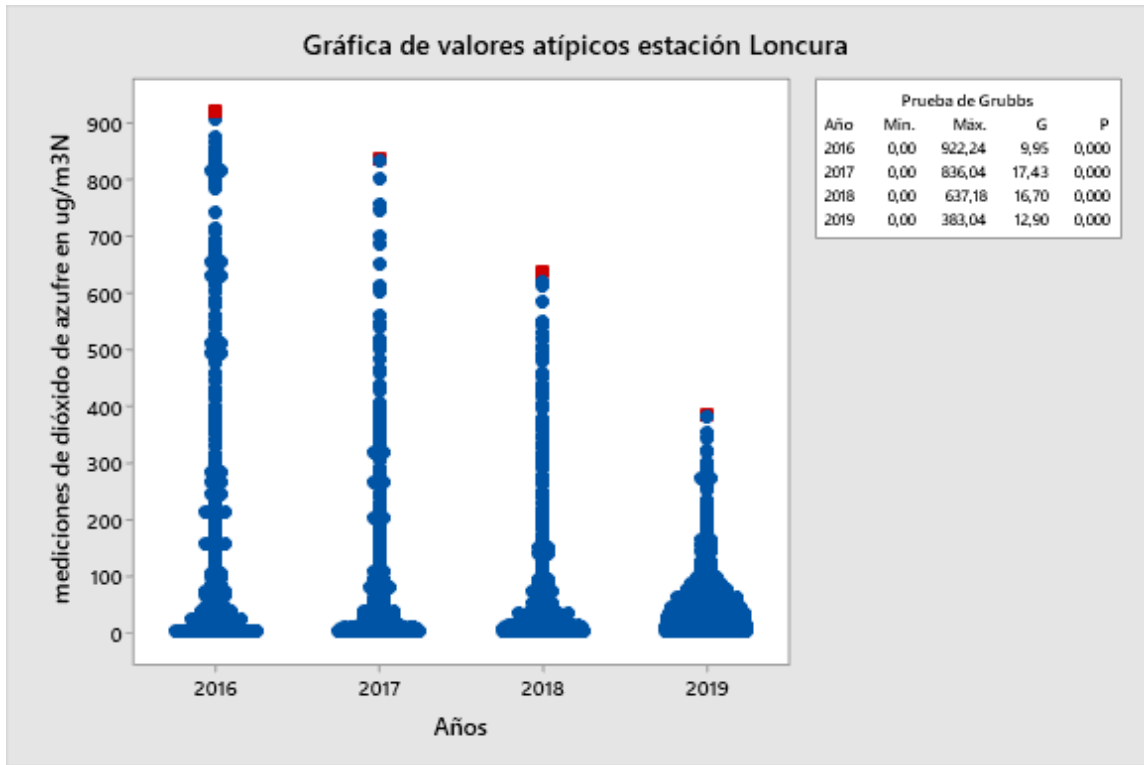
Gráfica 3-5: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Quintero

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



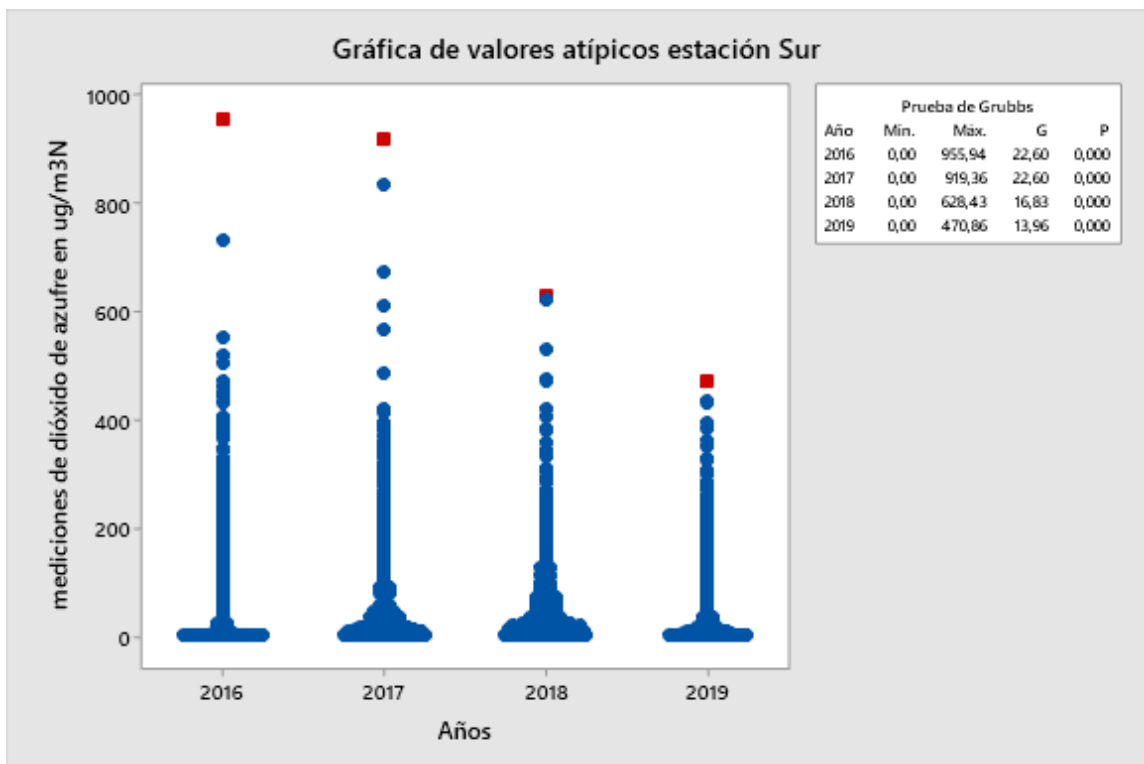
Gráfica 3-6: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Centro Quintero

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



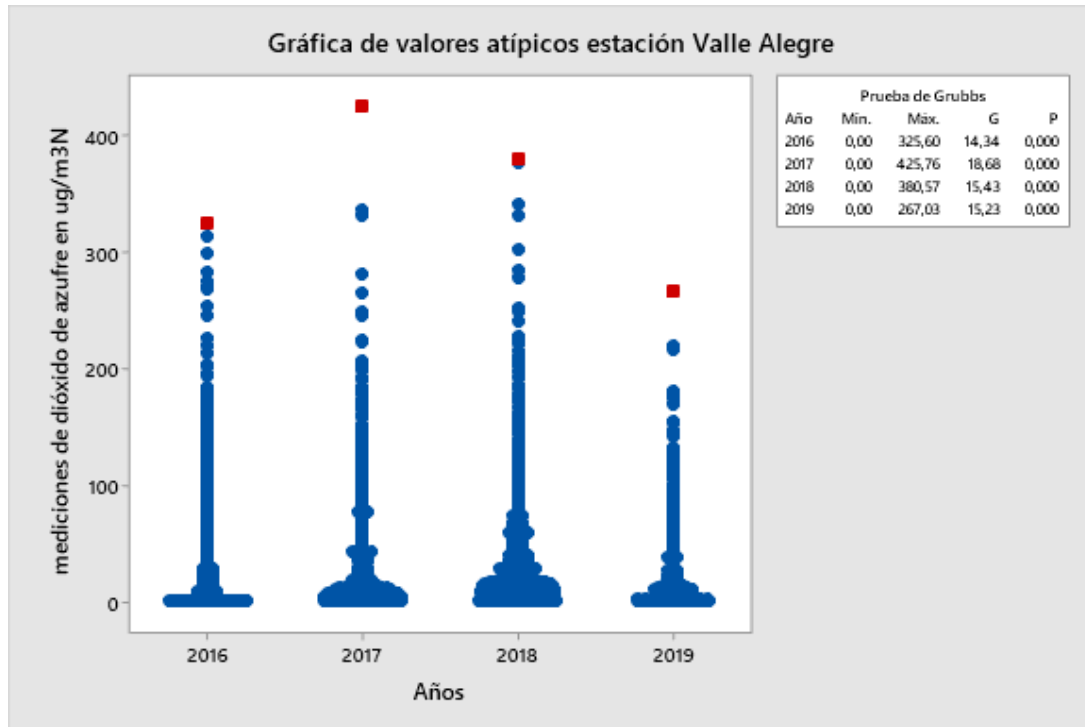
Gráfica 3-7: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Loncura

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-8: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Sur

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-9: Resultado prueba de Grubbs para valores atípicos estación Valle Alegre

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

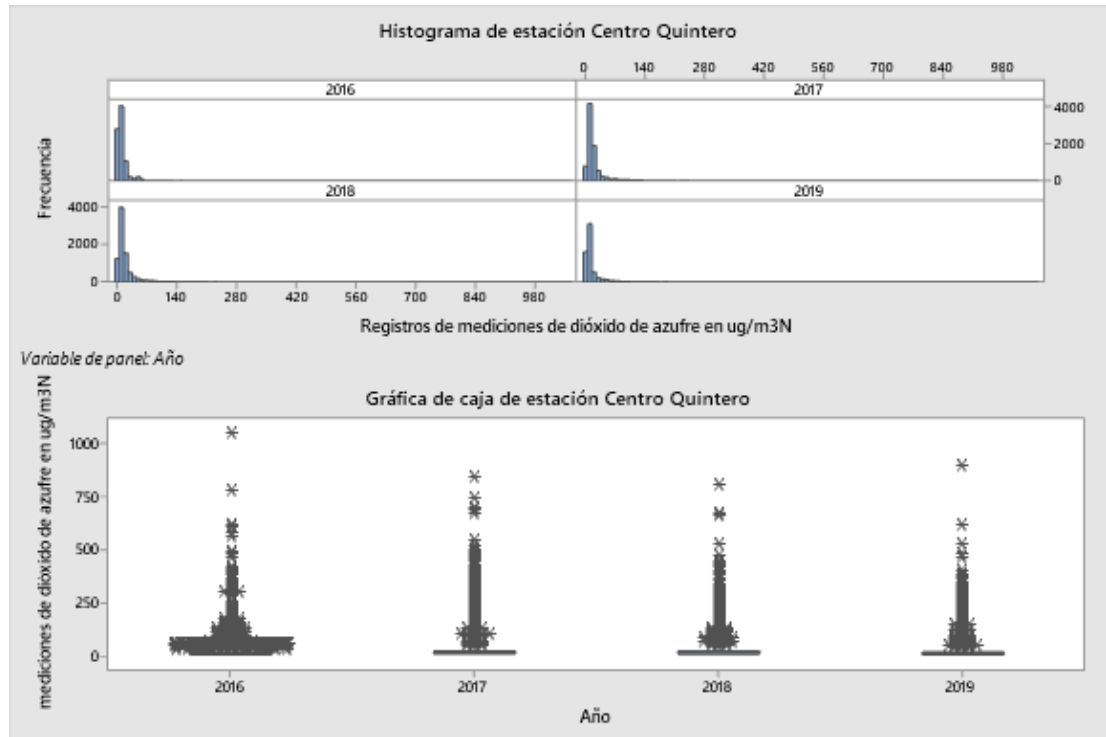
### 3.5. ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS

#### 3.5.1. Estadísticas descriptivas estación Centro Quintero

Tabla 3-4: Estadísticos de estación Centro Quintero

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros	2016	8439	15,54	0,390	36,54	1335,05	0,000	3,99	8,29
SO <sub>2</sub>	2017	8651	28,318	0,550	51,439	2645,964	0,000	9,000	14,070
	2018	8638	24,912	0,464	43,451	1888,011	0,000	6,750	11,690
	2019	6439	22,154	0,525	42,526	1808,491	0,000	5,040	8,270
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros	2016	14,41	1055,34	1055,34	10,30	164,69			
SO <sub>2</sub>	2017	22,590	847,660	847,660	5,62	45,42			
	2018	21,825	808,350	808,350	5,46	47,04			
	2019	16,797	901,380	901,380	5,74	57,70			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-10: Histograma y gráfica boxplot de estación Centro Quintero

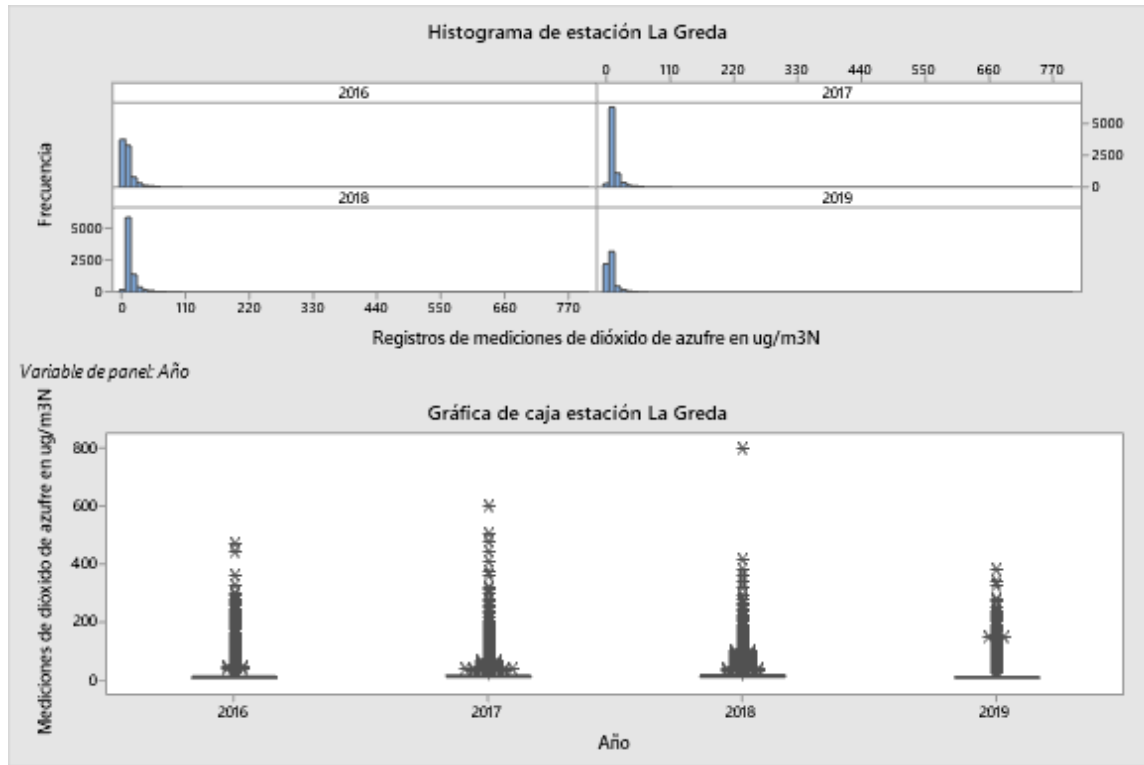
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

### 3.5.2. Estadísticas descriptivas estación La Greda

Tabla 3-5: Estadísticos de estación La Greda

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros SO <sub>2</sub>	2016	8696	13,260	0,259	24,270	589,038	0,7580	4,463	5,810
	2017	8616	16,592	0,272	25,488	649,632	4,099	8,140	9,323
	2018	8664	17,496	0,253	23,646	559,138	0,210	8,380	11,380
	2019	6503	11,762	0,251	20,238	409,564	0,790	4,561	5,951
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros SO <sub>2</sub>	2016	12,107	468,565	468,565	6,92	71,00			
	2017	15,127	602,175	602,175	8,44	112,75			
	2018	16,940	803,240	803,240	9,45	189,98			
	2019	10,079	378,784	378,784	7,11	74,26			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-11: Histograma y gráfica boxplot de estación La Greda

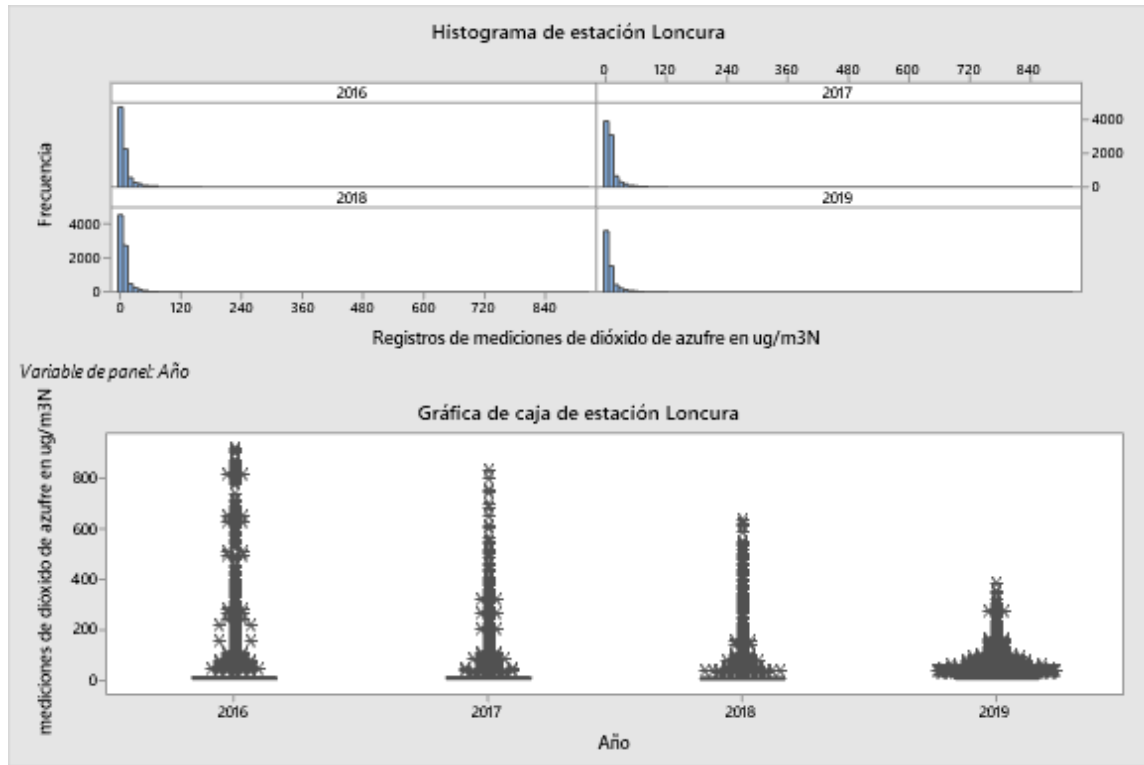
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

### 3.5.3. Estadísticas descriptivas estación Loncura

Tabla 3-6: Estadísticos de estación Loncura

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros SO <sub>2</sub>	2016	7334	24,522	0,963	90,251	8145,210	0,000	1,115	4,383
	2017	7534	16,210	0,502	47,030	2211,827	0,000	1,980	5,410
	2018	7175	12,754	0,399	37,380	1397,261	0,000	0,860	4,685
	2019	6476	13,502	0,354	28,639	820,189	0,000	2,620	4,190
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros SO <sub>2</sub>	2016	11,879	922,240	922,240	6,93	52,32			
	2017	11,900	836,040	836,040	8,58	97,37			
	2018	9,617	637,180	637,180	8,99	102,73			
	2019	11,790	383,040	383,040	5,59	42,79			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-12: Histograma y gráfica boxplot de estación Loncura

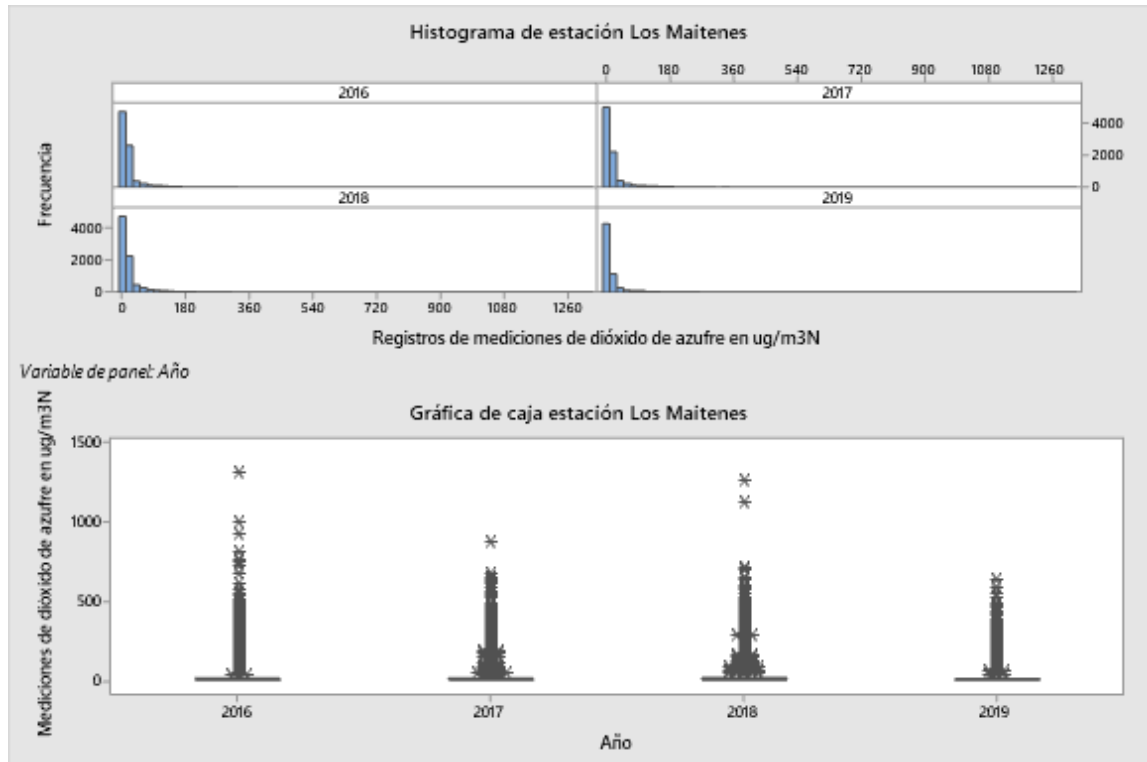
Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

#### 3.5.4. Estadísticas descriptivas estación Los Maitenes

Tabla 3-7: Estadísticos de estación Los Maitenes

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros SO <sub>2</sub>	2016	8714	27,51	0,678	63,56	4039,65	0,272	5,55	9,41
	2017	8592	28,068	0,654	61,188	3743,960	0,000	4,802	8,817
	2018	8669	30,22	0,671	62,83	3947,90	1,830	5,68	8,91
	2019	6481	23,119	0,610	49,172	2417,911	0,088	4,234	6,521
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros SO <sub>2</sub>	2016	17,02	1315,34	1315,34	6,23	60,03			
	2017	17,617	877,240	877,240	4,77	29,89			
	2018	21,25	1258,26	1258,26	5,57	50,88			
	2019	14,669	636,304	636,304	4,70	29,51			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-13: Histograma y gráfica boxplot de estación Los Maitenes

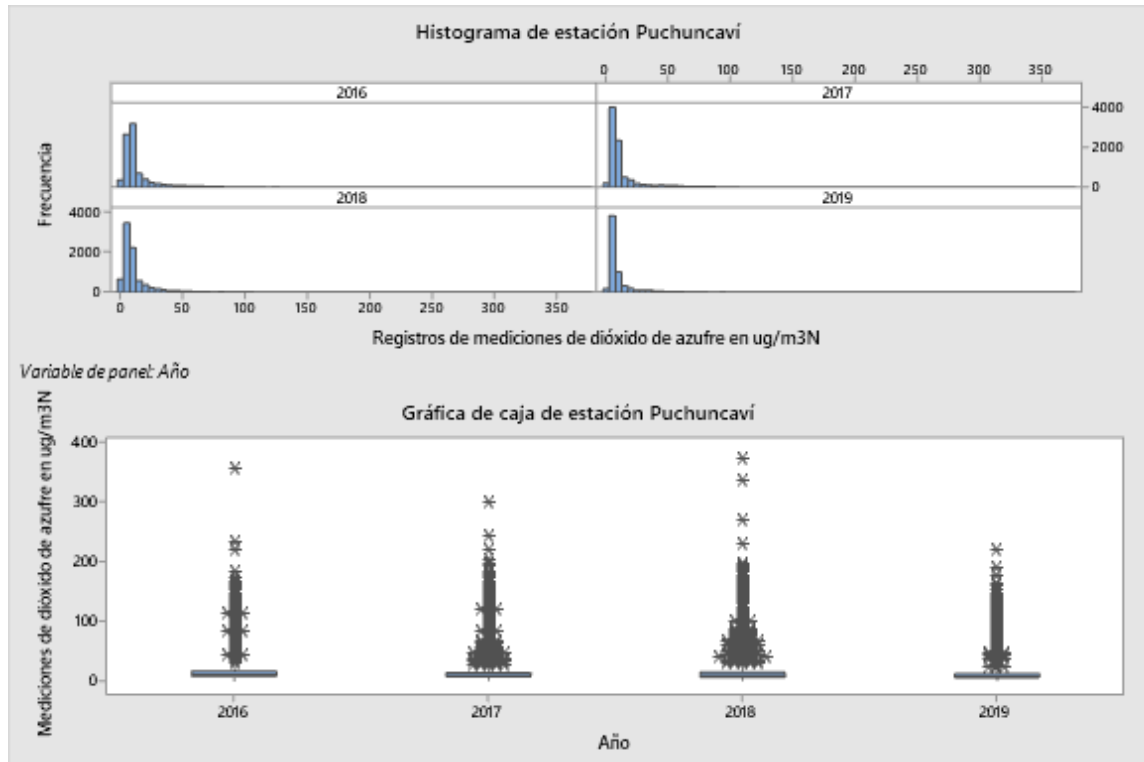
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.5.5. Estadísticas descriptivas estación Puchuncaví

Tabla 3-8: Estadísticos de estación Puchuncaví

Variable	Año	Conteo		Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
		total	Media						
Registros	2016	8677	16,157	0,221	20,699	428,429	0,269	6,642	9,139
SO <sub>2</sub>	2017	8668	15,162	0,225	21,105	445,426	1,660	5,940	7,660
	2018	8687	14,700	0,225	21,033	442,395	0,040	4,950	7,780
	2019	6498	12,228	0,215	17,338	300,600	0,770	4,217	5,476
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros	2016	15,056	356,314	356,314	3,69	21,32			
SO <sub>2</sub>	2017	12,870	300,550	300,550	3,79	20,00			
	2018	13,620	374,110	374,110	4,38	32,68			
	2019	10,913	220,884	220,884	3,77	19,52			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-14: Histograma y gráfica boxplot de estación Puchuncaví

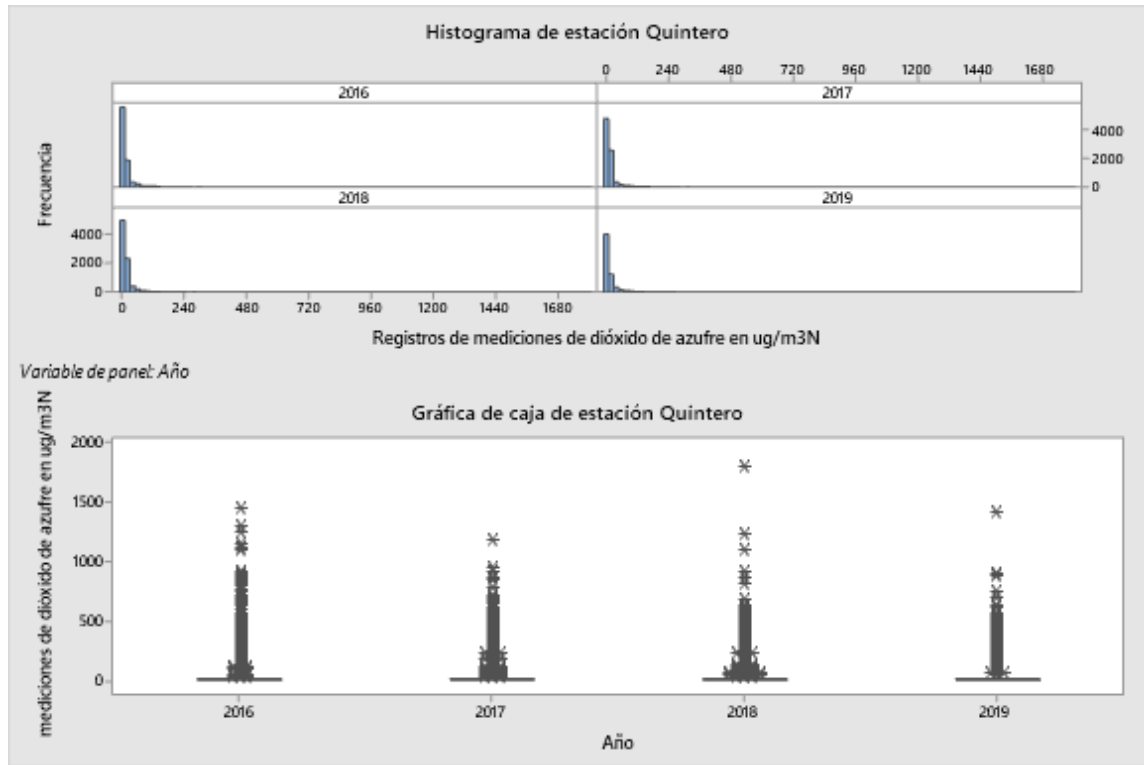
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.5.6. Estadísticas descriptivas estación Quintero

Tabla 3-9: Estadísticos de estación Quintero

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
Registros	2016	8702	28,45	0,829	77,71	6039,33	0,182	6,09	8,12	15,42
SO <sub>2</sub>	2017	8611	30,82	0,798	74,65	5572,97	0,000	6,47	9,26	16,59
	2018	8663	25,98	0,673	62,98	3966,04	0,000	5,13	8,79	16,52
	2019	6491	28,23	0,801	64,65	4180,21	1,311	5,13	7,45	18,76
Variable	Año	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis					
Registros	2016	1451,30	1451,30	7,34	75,63					
SO <sub>2</sub>	2017	1184,56	1184,56	5,55	40,75					
	2018	1793,73	1793,73	8,16	125,05					
	2019	1411,24	1411,24	6,23	65,11					

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-15: Histograma y gráfica boxplot de estación Quintero

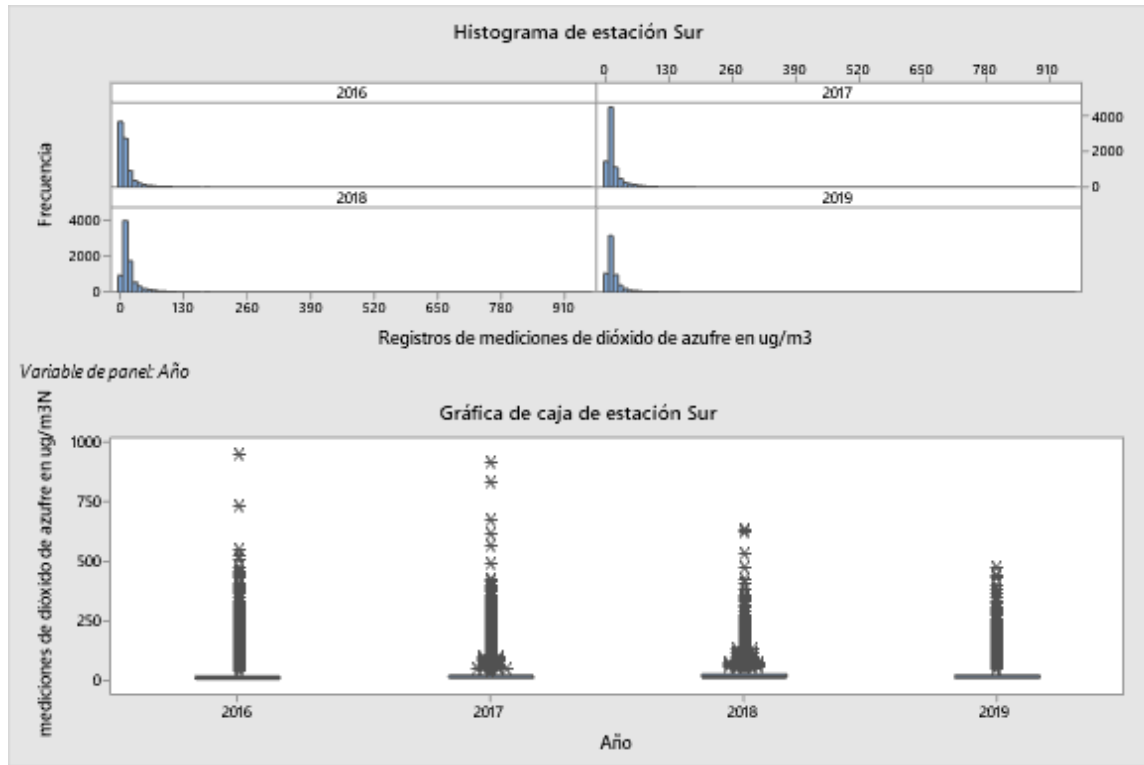
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.5.7. Estadísticas descriptivas estación Sur

Tabla 3-10: Estadísticos de estación Sur

Variable	Año	Conteo		Error estándar de la		Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
		total	Media	media	media					
SO <sub>2</sub>	2016	8632	19,056	0,442	41,449	1718,031	0,758	3,432	6,718	
	2017	8573	21,541	0,424	39,725	1578,087	4,099	6,320	9,789	
	2018	8587	23,962	0,384	35,923	1290,497	0,210	7,810	12,985	
	2019	6476	20,146	0,401	32,280	1041,979	0,790	6,321	9,657	
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis				
SO <sub>2</sub>	2016	16,316	955,940	955,940	6,75	74,62				
	2017	19,440	919,360	919,360	7,17	89,78				
	2018	23,245	628,430	628,430	5,29	46,75				
	2019	20,040	470,862	470,862	5,37	42,15				

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-16: Histograma y gráfica boxplot de estación Sur

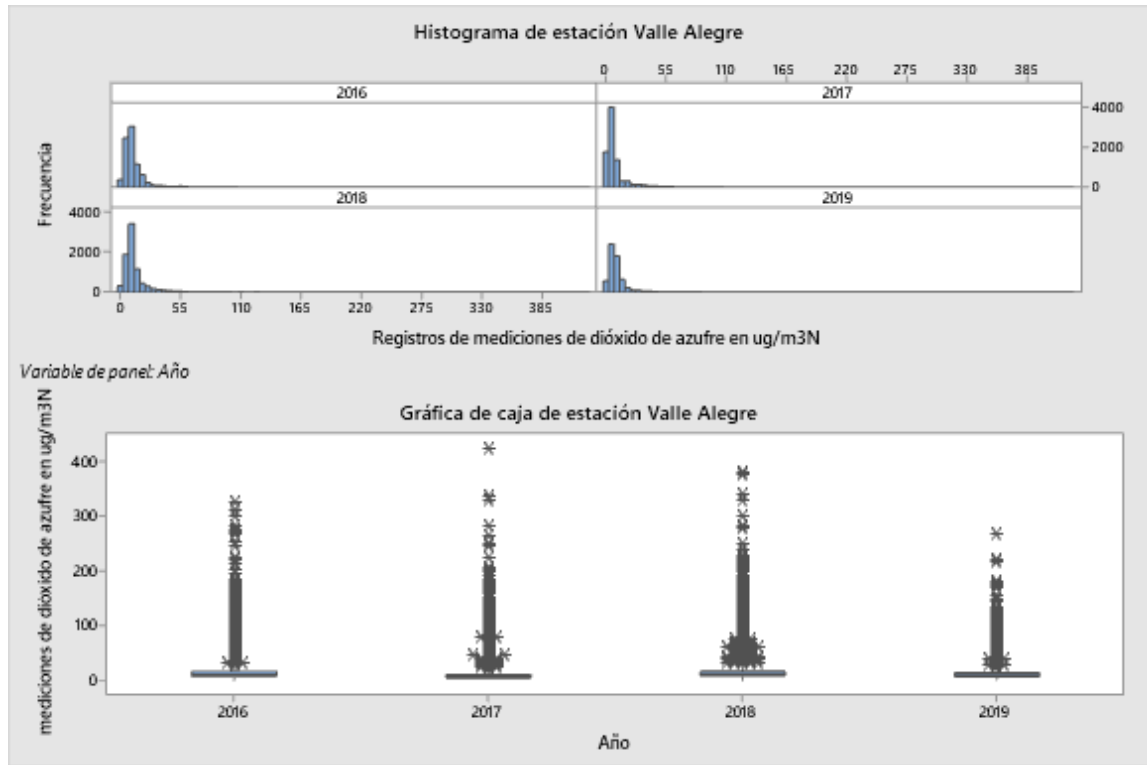
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.5.8. Estadísticas descriptivas estación Valle Alegre

Tabla 3-11: Estadísticos de estación Valle Alegre

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros SO <sub>2</sub>	2016	8677	15,165	0,231	21,649	468,670	0,000	6,731	9,382
	2017	7735	11,500	0,237	22,175	491,727	0,000	2,970	5,649
	2018	8595	16,812	0,252	23,574	555,710	0,000	7,380	9,860
	2019	6393	12,204	0,209	16,730	279,883	0,000	5,000	7,858
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros SO <sub>2</sub>	2016	14,954	325,595	325,595	5,57	44,65			
	2017	9,430	425,760	425,760	5,66	50,12			
	2018	15,840	380,570	380,570	5,43	45,12			
	2019	12,397	267,032	267,032	5,04	37,23			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab



Gráfica 3-17: Histograma y gráfica boxplot de estación Valle Alegre

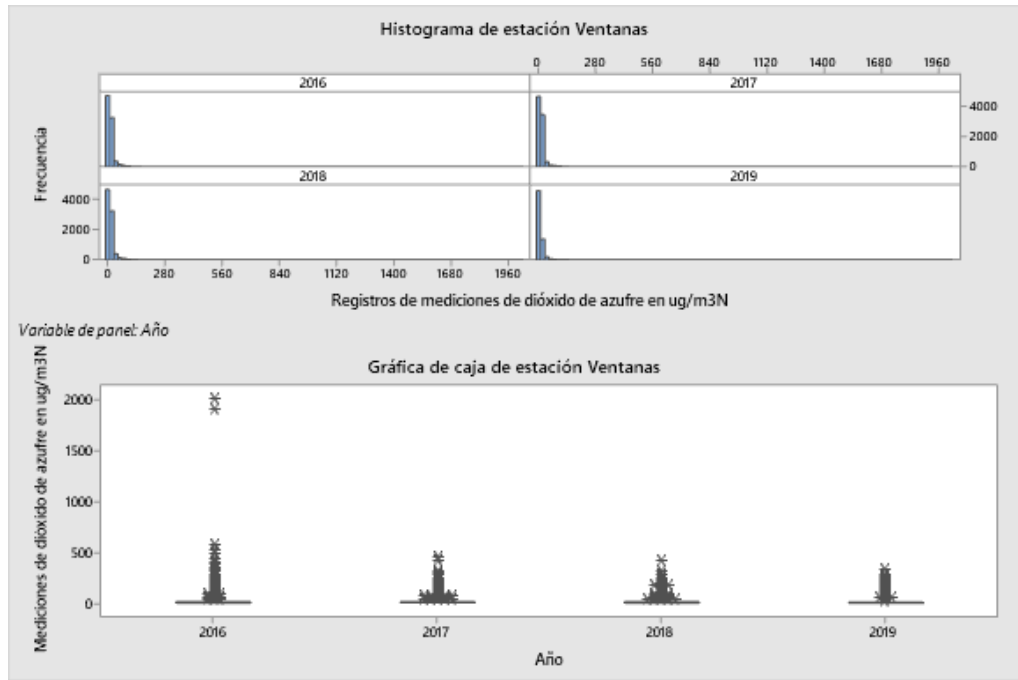
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.5.9. Estadísticas descriptivas estación Ventanas

Tabla 3-12: Estadísticos de estación Ventanas

Variable	Año	Conteo total	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Q1	Mediana
Registros SO <sub>2</sub>	2016	8694	17,23	0,447	41,92	1757,41	0,000	5,93	9,48
	2017	8613	15,101	0,230	21,559	464,803	2,320	6,700	9,652
	2018	8618	15,361	0,227	21,237	450,989	0,190	6,022	9,350
	2019	6455	11,891	0,253	20,370	414,917	1,751	3,273	6,109
Variable	Año	Q3	Máximo	Rango	Asimetría	Curtosis			
Registros SO <sub>2</sub>	2016	16,04	2024,33	2024,33	25,80	1096,53			
	2017	14,932	456,147	456,147	7,01	75,69			
	2018	16,098	420,520	420,520	5,49	47,99			
	2019	11,406	323,522	323,522	5,94	49,86			

Fuente: Elaboración propia a partir de base de datos en Minitab

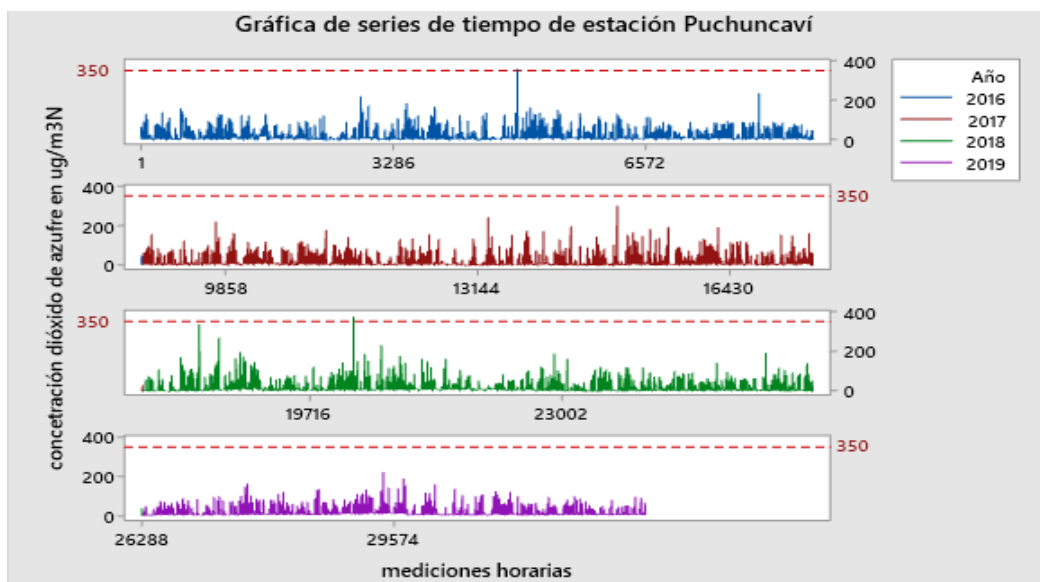


Gráfica 3-18: Histograma y gráfica boxplot de estación Ventanas

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

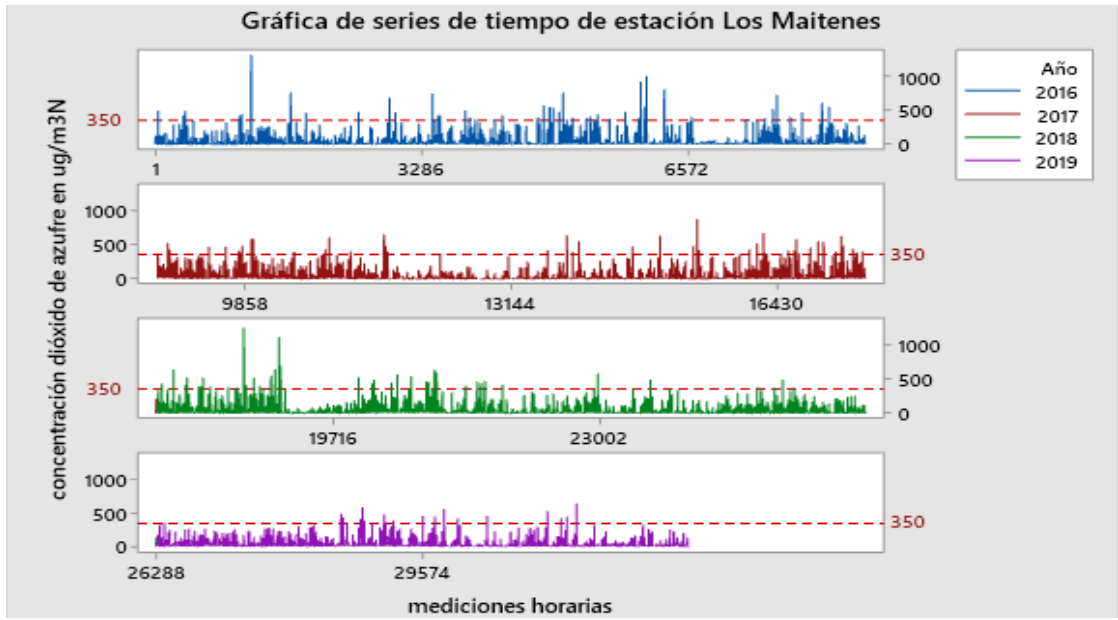
### 3.6. CAPACIDAD DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO

#### 3.6.1. Series temporales



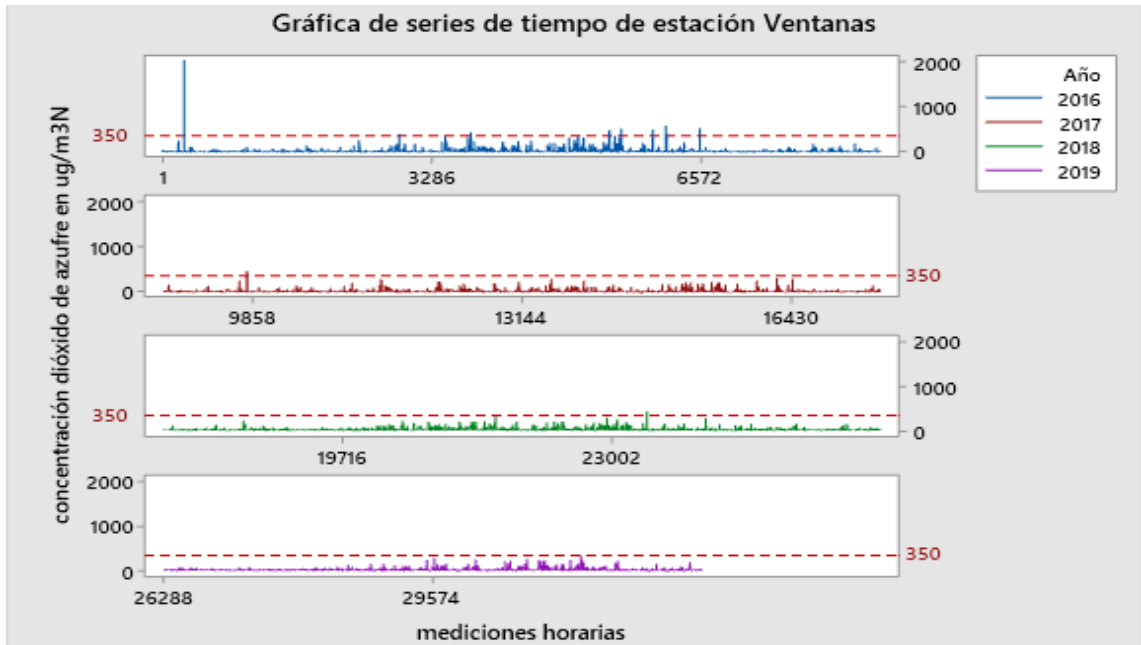
Gráfica 3-19: Serie de tiempo de estación Puchuncaví

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



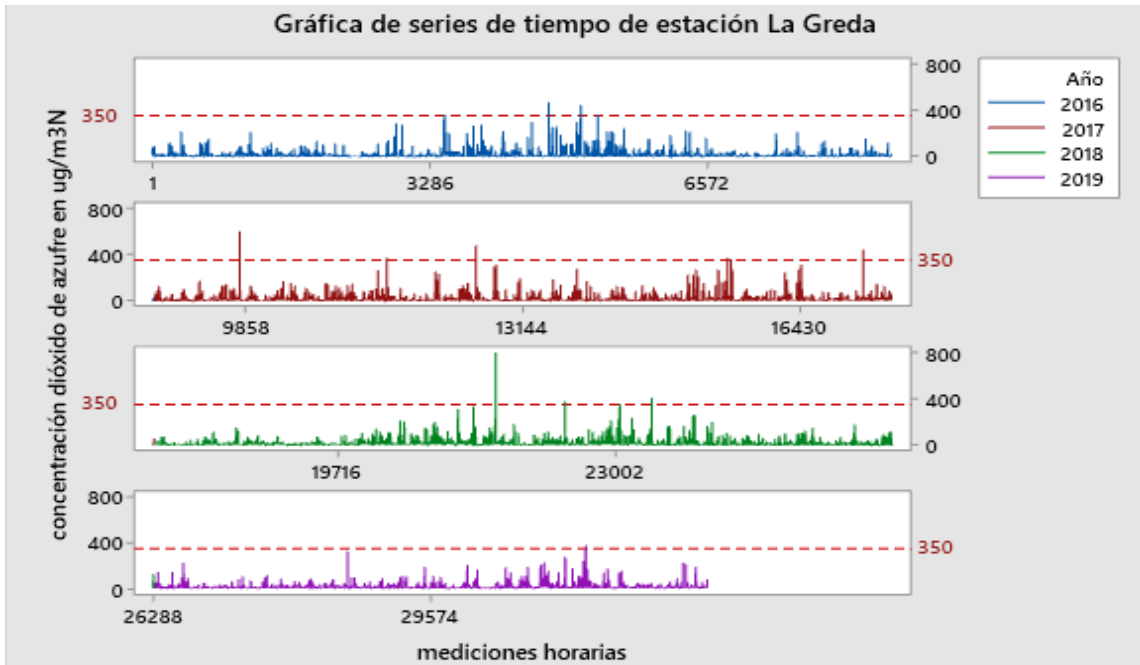
Gráfica 3-20: Serie de tiempo de estación Los Maitenes

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



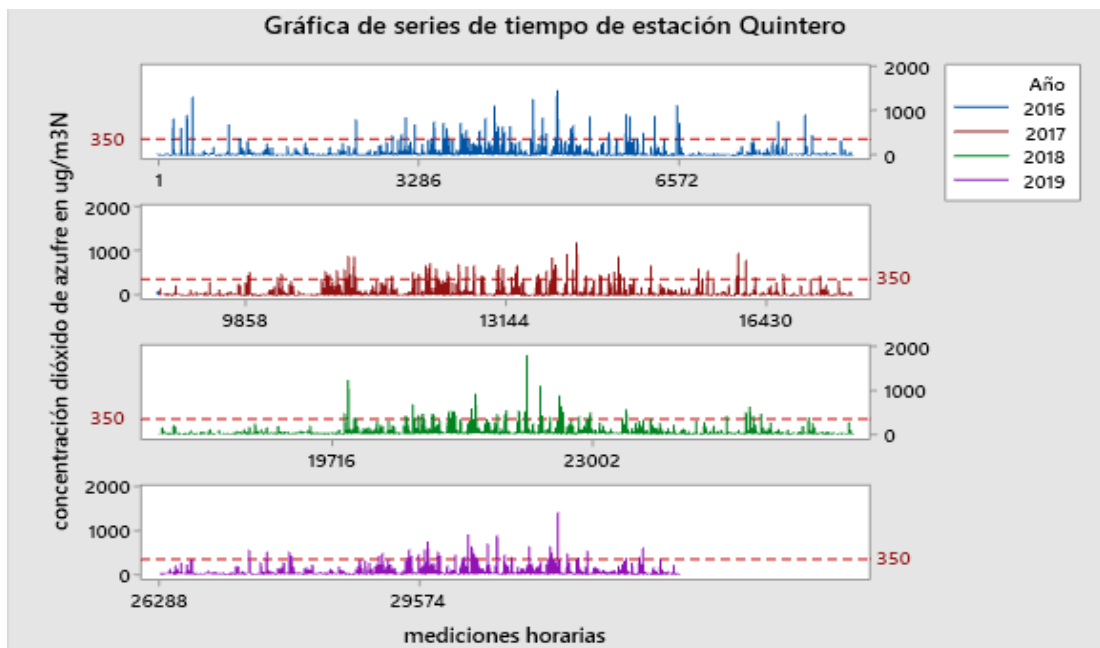
Gráfica 3-21: Serie de tiempo de estación Ventanas

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



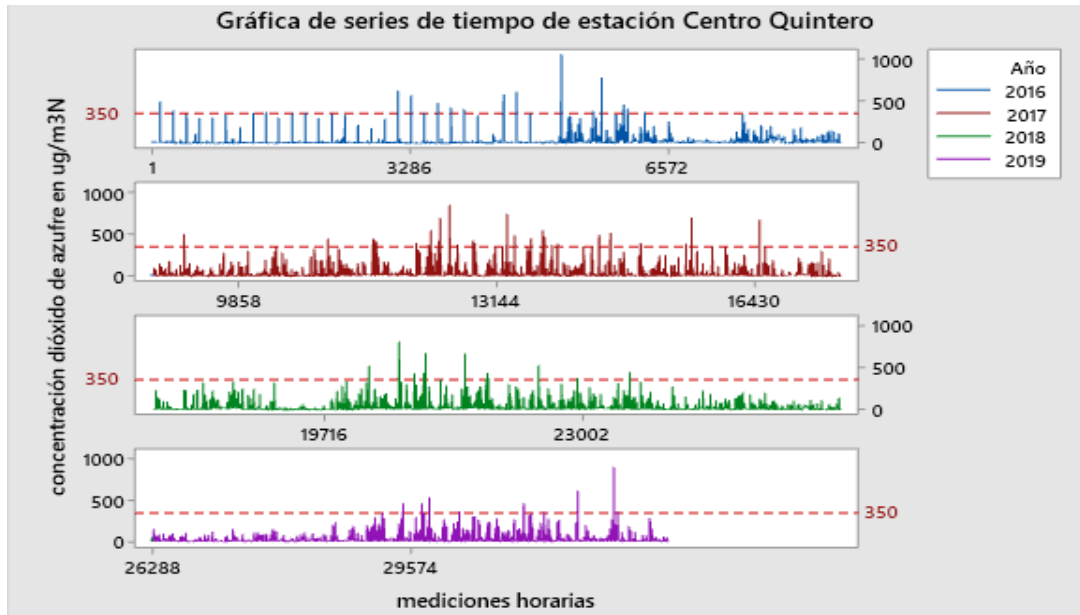
Gráfica 3-22: Serie de tiempo de estación La Greda

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



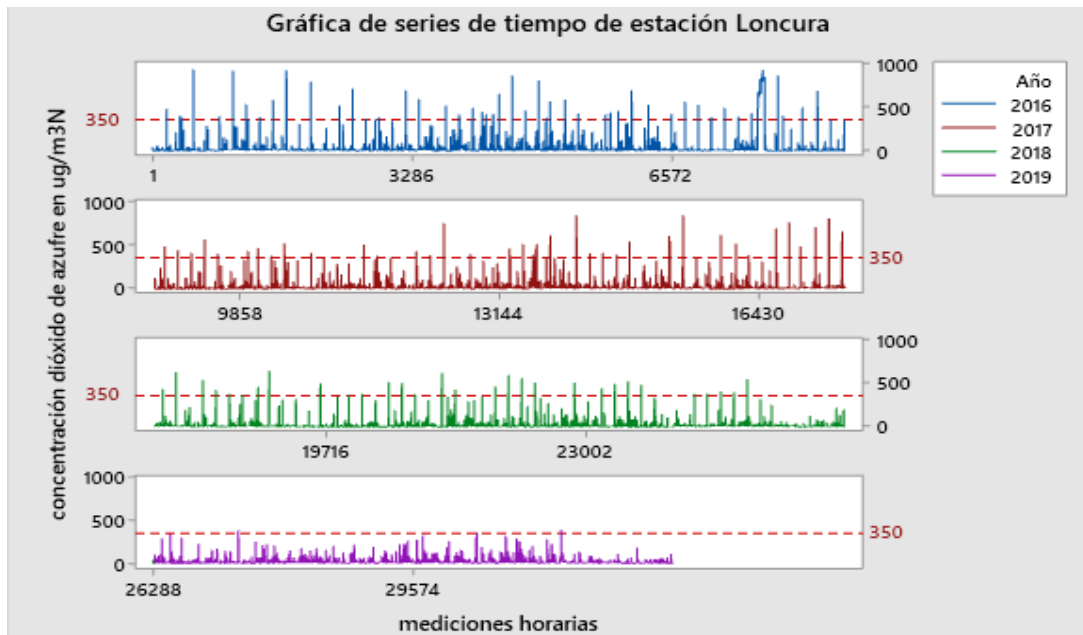
Gráfica 3-23: serie de tiempo de estación Quintero

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



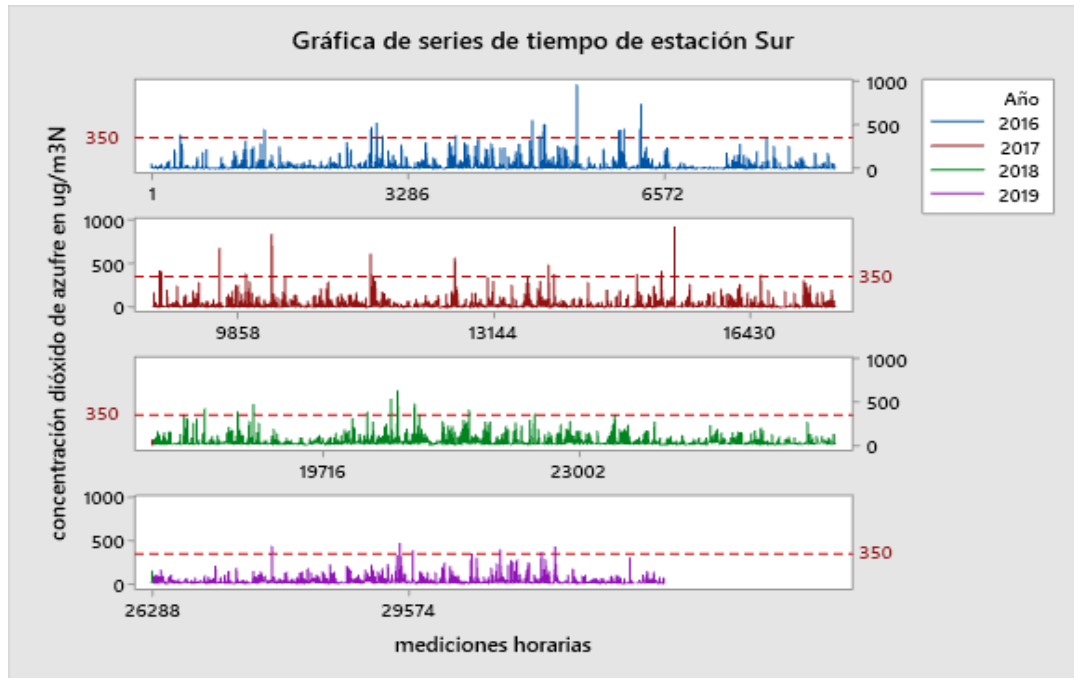
Gráfica 3-24: Serie de tiempo de estación Centro Quintero

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



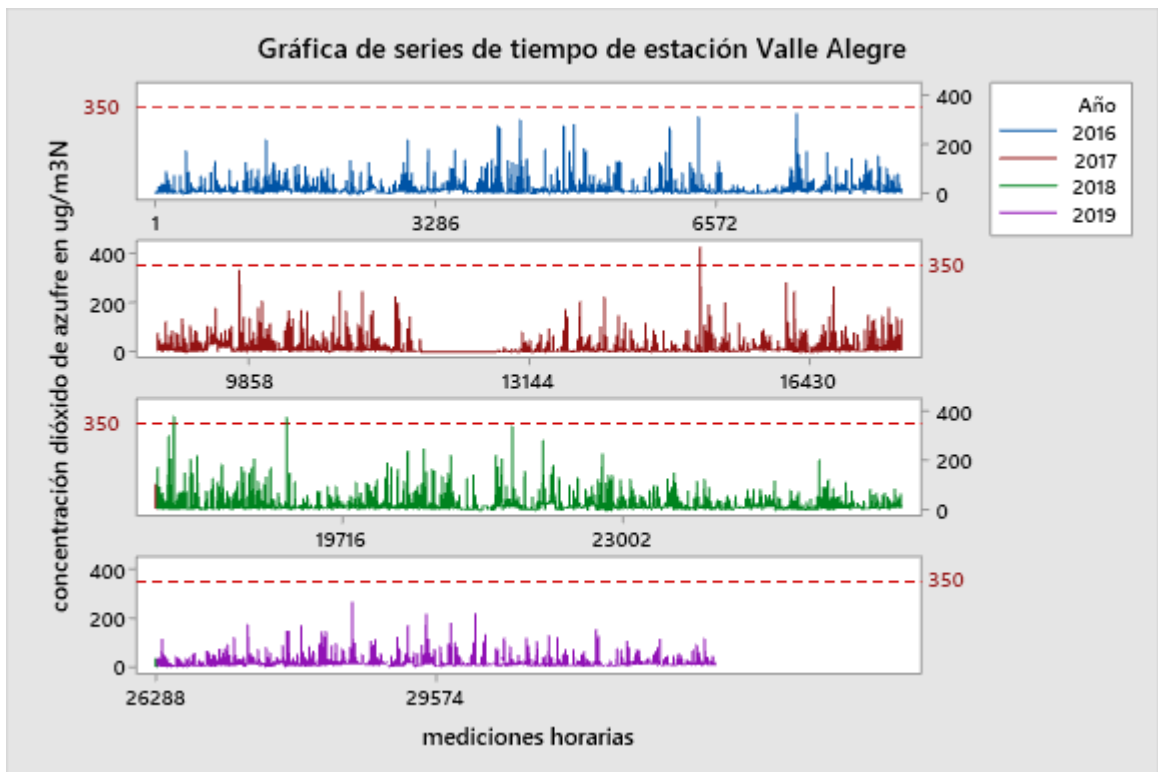
Gráfica 3-25: Serie de tiempo de estación Loncura

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



Gráfica 3-26: Serie de tiempo de estación Sur

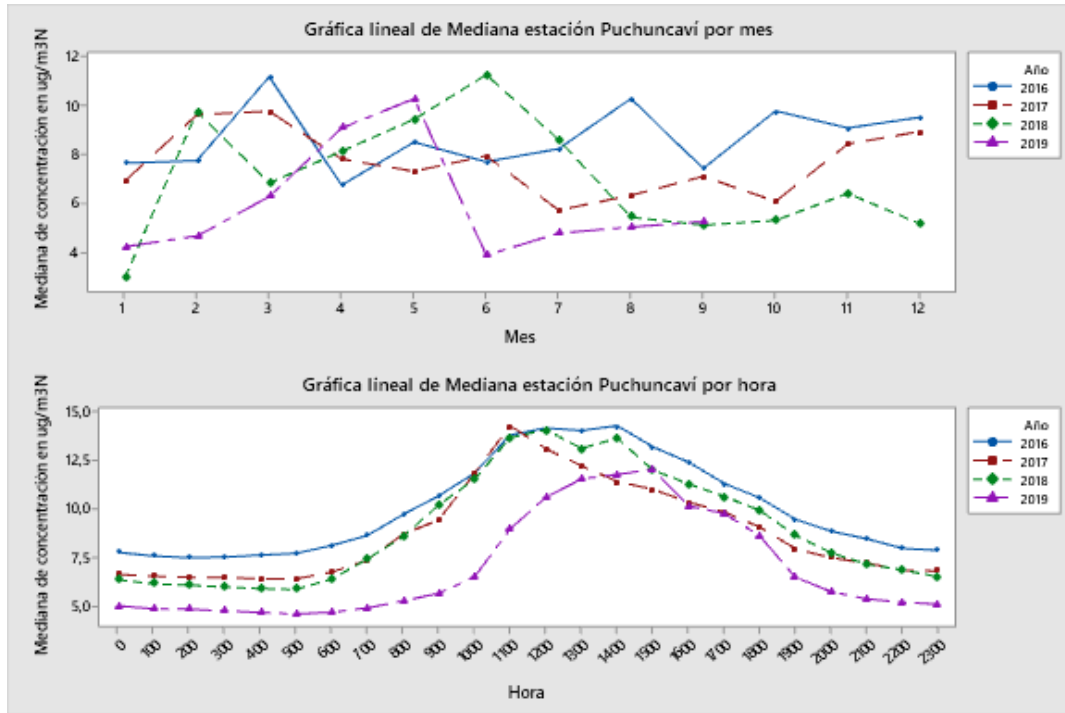
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



Gráfica 3-27: Serie de tiempo de estación Valle Alegre

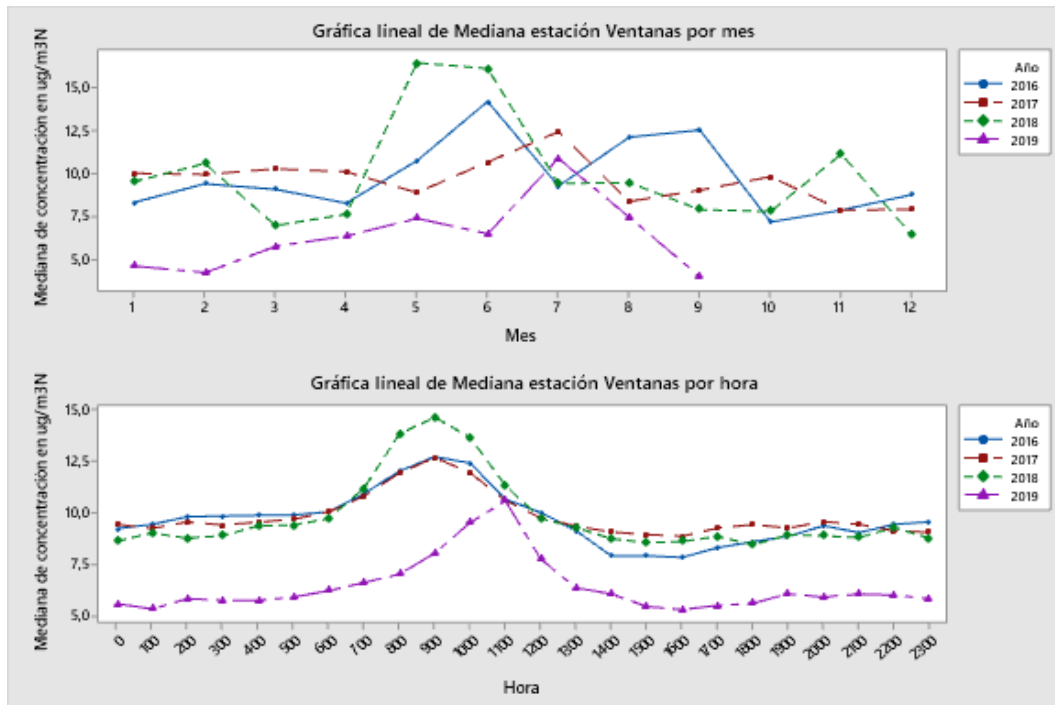
Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

3.6.2. Comportamiento del SO<sub>2</sub> en las comunas de Quintero y Puchuncaví



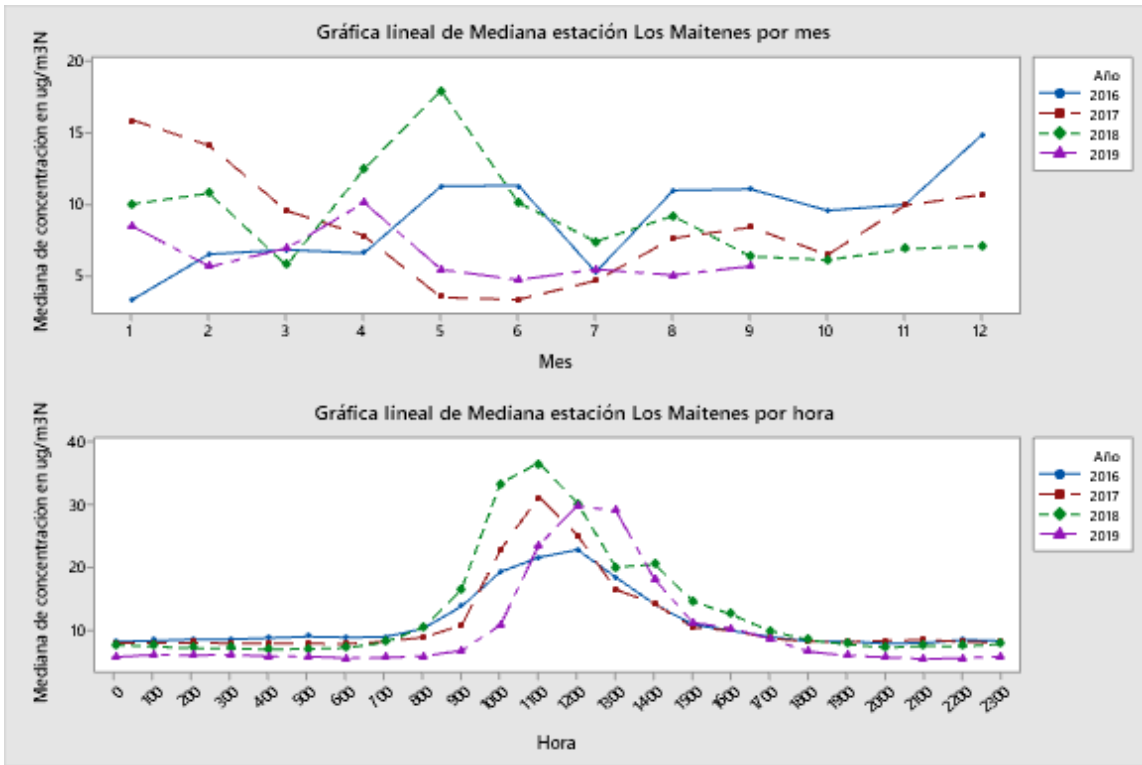
Gráfica 3-28: Gráfica lineal de la mediana estación Puchuncaví

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



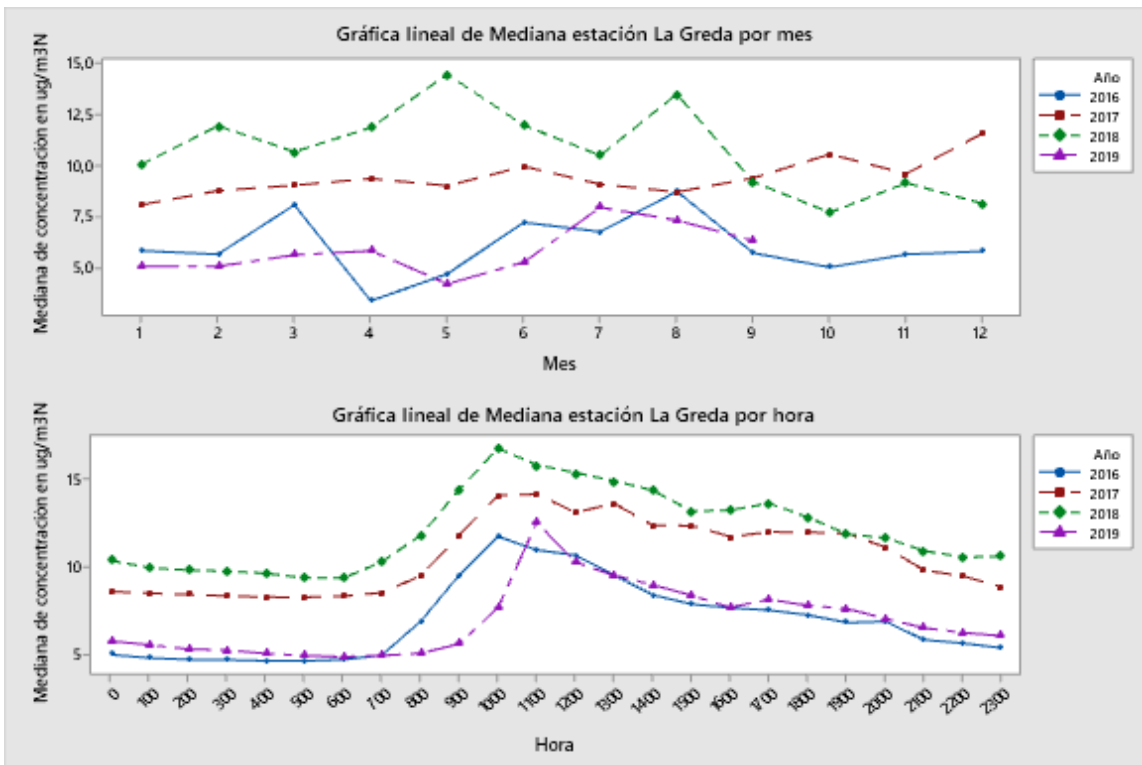
Gráfica 3-29: Gráfica lineal de la mediana estación Ventanas

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



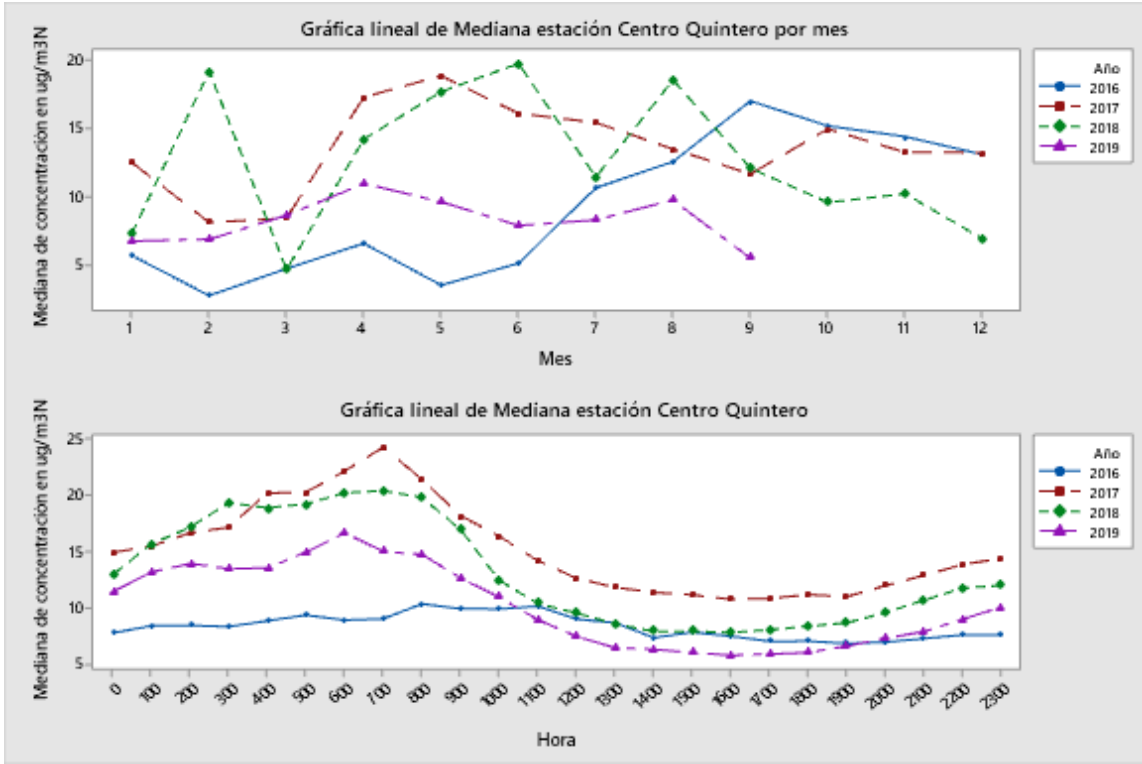
Gráfica 3-30: Gráfica lineal de la mediana estación Los Maitenes

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



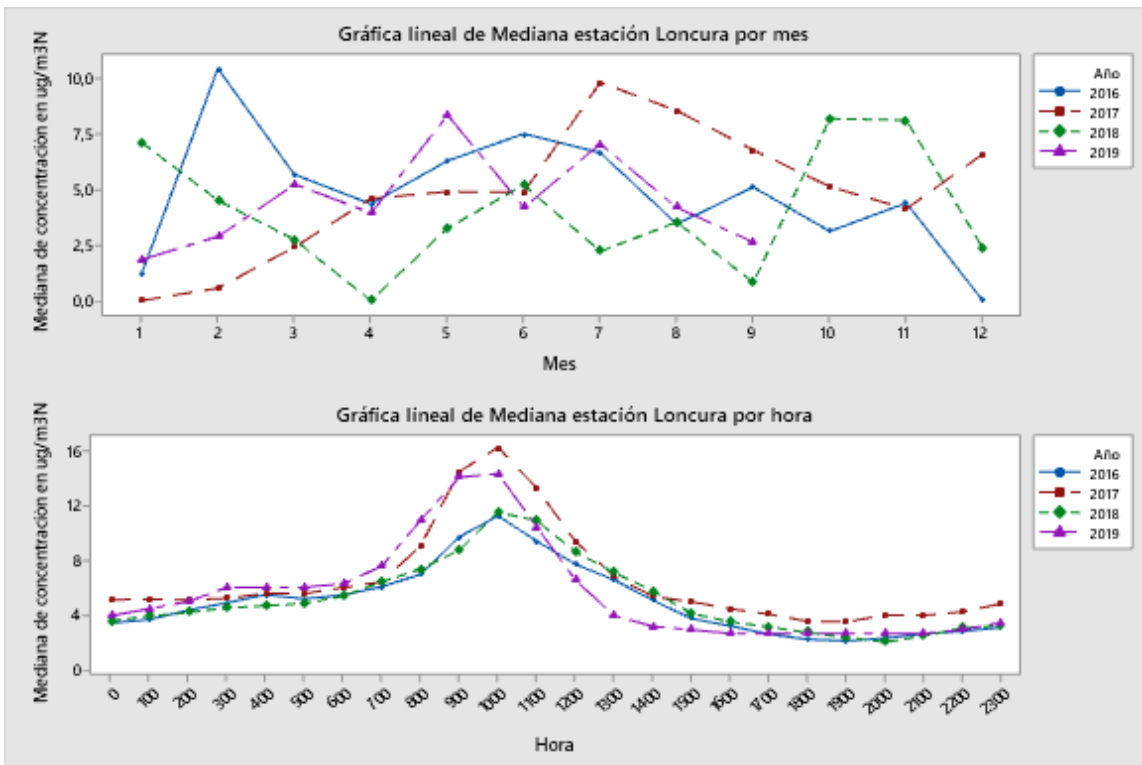
Gráfica 3-31: Gráfica lineal de la mediana estación La Greda

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



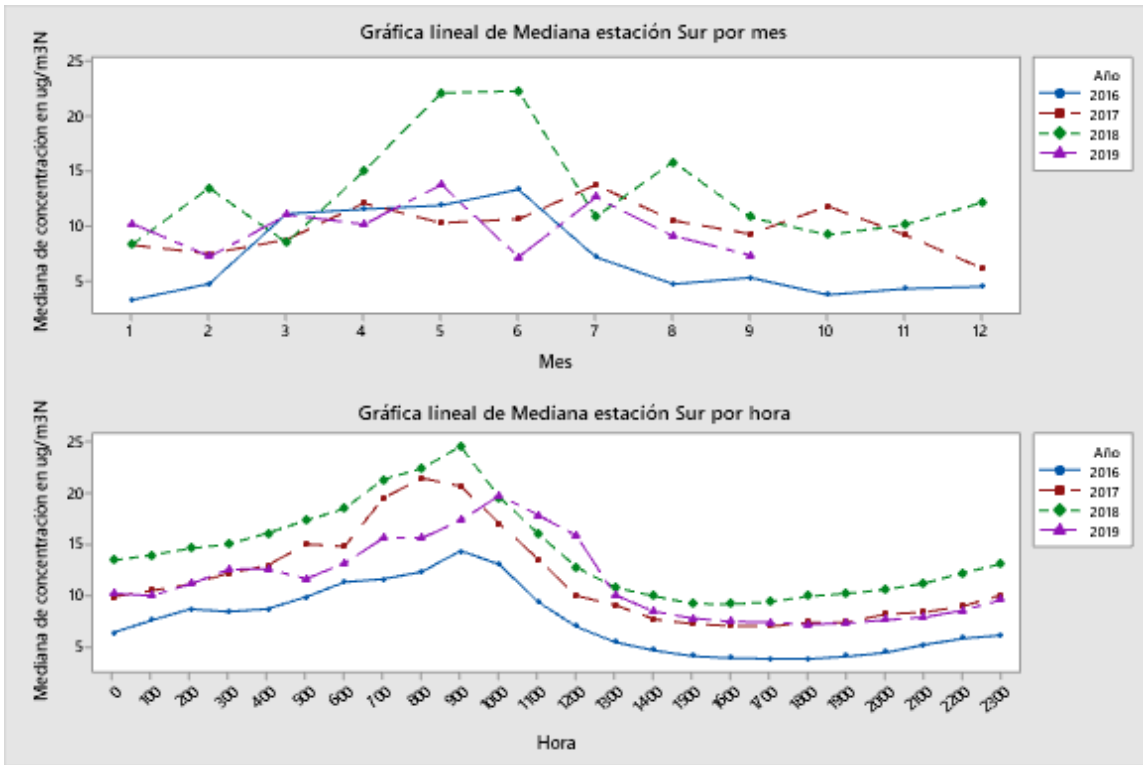
Gráfica 3-32: Gráfica lineal de la mediana estación Centro Quintero

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



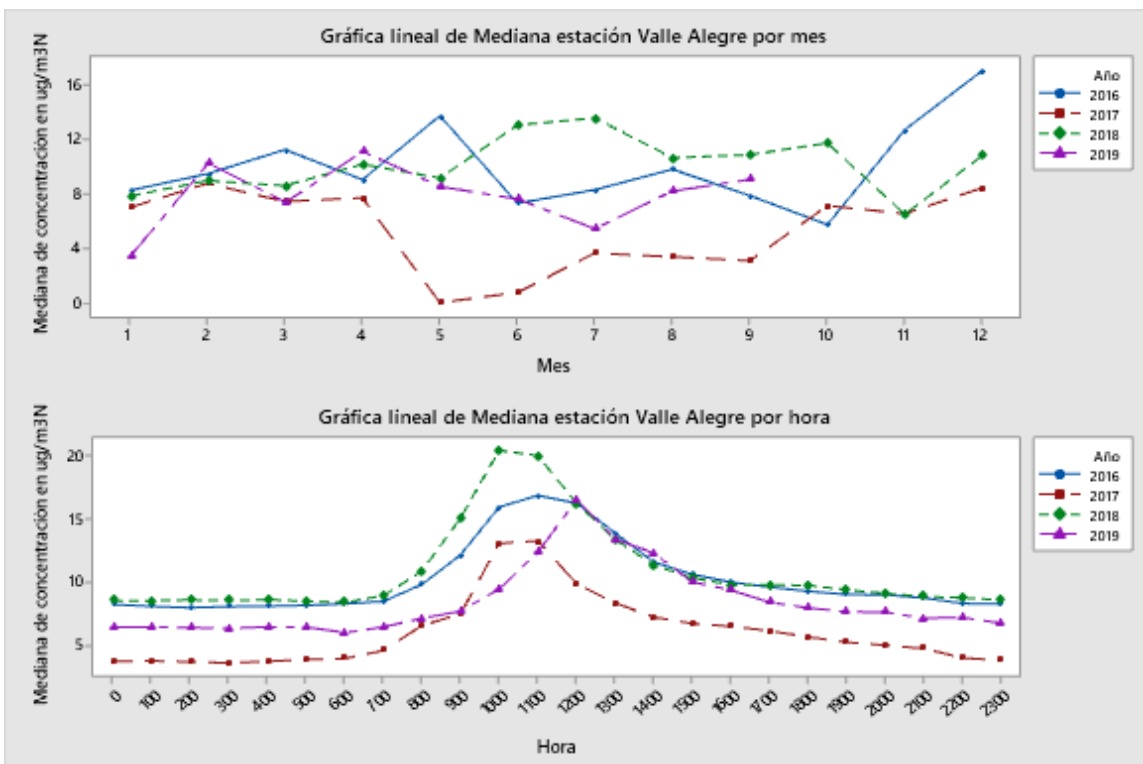
Gráfica 3-33: Gráfica lineal de la mediana estación Loncura

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



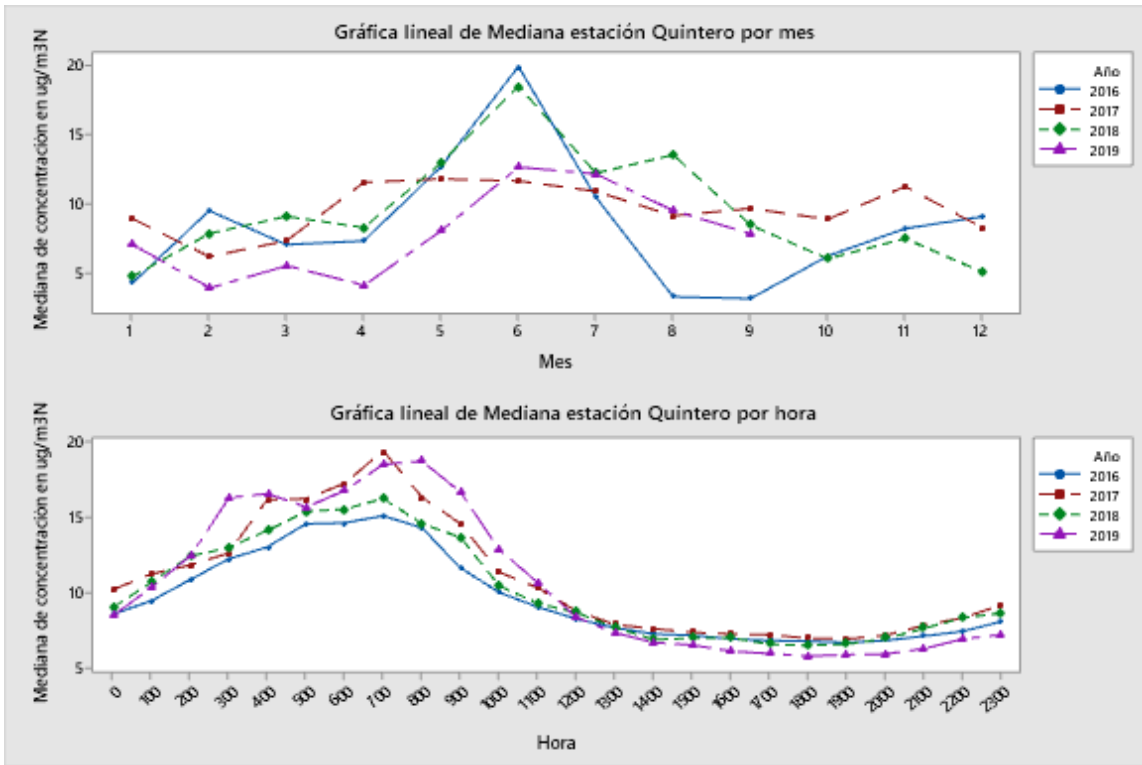
Gráfica 3-34: Gráfica lineal de la mediana estación Sur

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



Gráfica 3-35: Gráfica lineal de la mediana estación Loncura

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos



Gráfica 3-36: Gráfica lineal de la mediana estación Quintero

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

### 3.7. CUMPLIMIENTO PRELIMINAR DEL D.S. N°104/2018

#### 3.7.1. Índice de calidad de aire de gases referido al dióxido de azufre

Tabla 3-13: ICAGSO<sub>2</sub> estaciones de monitoreo de calidad del aire

Estación de monitoreo	ICAGSO <sub>2</sub>	0-99	100-199	200-299	300-399	400-499	500
	SO <sub>2</sub> /h (µg/m <sup>3</sup> N)	0-349	350-499	500-649	650-799	800-949	≥ 950
	Año	Cuenta de datos					
Puchuncaví	2016	8.676	1	-	-	-	-
	2017	8.668	-	-	-	-	-
	2018	8.686	1	-	-	-	-
	2019	6.498	-	-	-	-	-
La Greda	2016	8.692	4	-	-	-	-
	2017	8.608	6	2	-	-	-
	2018	8.659	4	-	-	1	-
	2019	6.502	1	-	-	-	-
Los Maitenes	2016	8.640	52	11	7	2	2
	2017	8.528	46	15	2	1	-
	2018	8.601	45	19	2	-	2
	2019	6.460	17	4	-	-	-
Ventanas	2016	8.680	9	3	-	-	2
	2017	8.611	2	-	-	-	-
	2018	8.617	1	-	-	-	-
	2019	6.455	-	-	-	-	-
Centro Quintero	2016	8.414	19	4	1	-	1
	2017	8.603	38	4	5	1	-
	2018	8.618	15	2	2	1	-
	2019	6.426	10	2	-	1	-
Loncura	2016	7.186	38	32	34	44	-
	2017	7.489	27	10	5	3	-
	2018	7.142	22	11	-	-	-
	2019	6.473	3	-	-	-	-
Quintero	2016	8.598	51	23	12	12	6
	2017	8.494	71	29	10	6	1
	2018	8.594	48	14	1	3	3
	2019	6.437	35	14	2	2	1
Sur	2016	8.610	16	4	1	-	1
	2017	8.555	13	2	1	2	-
	2018	8.577	7	3	-	-	-
	2019	6.469	7	-	-	-	-
Valle Alegre	2016	8.677	-	-	-	-	-
	2017	7.734	1	-	-	-	-
	2018	8.593	2	-	-	-	-
	2019	6.393	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia en Excel a partir de bases de datos

3.7.2. Percentil

Tabla 3-14: Percentiles de estaciones de monitoreo de calidad del aire

<b>Estación de monitoreo</b>	<b>Año</b>	<b>Percentil 98,5</b>	<b>Percentil 99</b>
Puchuncaví	2016	95,59	103,28
	2017	92,91	
	2018	91,62	
La Greda	2016	97,03	114,78
	2017	98,79	
	2018	93,80	
Los Maitenes	2016	280,41	305,61
	2017	281,12	
	2018	263,68	
Ventanas	2016	123,47	121,77
	2017	97,97	
	2018	96,61	
Centro Quintero	2016	125,76	226,79
	2017	226,79	
	2018	190,05	
Loncura	2016	494,39	288,72
	2017	189,35	
	2018	131,24	
Quintero	2016	303,1	358,34
	2017	337,11	
	2018	264,36	
Sur	2016	175,02	186,24
	2017	165,12	
	2018	154,29	
Valle Alegre	2016	98,82	113,59
	2017	102,06	
	2018	109,58	

Fuente: Elaboración propia en Minitab a partir de bases de datos

## DISCUSIÓN

En el presente trabajo se analizan datos de monitoreo de la calidad del aire de las estaciones ubicadas en las comunas de Quintero y Puchuncaví, las cuales son: Puchuncaví, Los Maitenes, La Greda, Ventanas, Loncura, Valle Alegre, Sur, Quintero y Centro Quintero desde el 01 de enero de 2016 hasta el 30 de septiembre de 2019. Los resultados obtenidos son comparados con el D.S. N°104/2018 del MMA que establece la “Norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre”. Cabe destacar que el anteproyecto de la norma de calidad primaria para dióxido de azufre fue publicado en septiembre de 2015.

En cuanto a los datos obtenidos desde el SINCA y los solicitados por la Ley 20.285/2008 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia “Sobre acceso a la información pública”, las estaciones contaban con los siguientes porcentajes de información acerca de las mediciones horarias de dióxido de azufre: Puchuncaví 99,14% (281 horas sin mediciones); La Greda 98,97% (337 horas sin mediciones); Los Maitenes 98,93% (350 horas sin mediciones); Ventanas 98,78% (400 horas sin mediciones); Centro Quintero 97,91% (688 horas sin mediciones); Loncura 86,80% (4.336 horas sin mediciones); Quintero 98,95% (344 horas sin mediciones); Sur 98,40% (527 horas sin mediciones) y Valle Alegre con un 96,03% (1.305 horas sin mediciones). Algunas de las mediciones faltantes corresponden (según al D.S. N°61/2008 del MINSAL que “Aprueba el reglamento de estaciones de medición de contaminantes atmosféricos”) a datos perdidos por falla eléctrica (2.a), fuera de temperatura de rango de medición (2.c), por mantención en terreno (2.e) y valores fuera de rango (2.h), pero aun así quedan horas en las mediciones no se hacen y no se especifica el motivo. Cabe destacar que el D.S. N°104/2018 del MMA no contempla la falta de mediciones ni con qué porcentaje mínimo de datos se puede verificar el cumplimiento de la norma.

Luego, los datos, por estación, se le aplica el test de normalidad de Anderson – Darling y el de Kolmogorov – Smirnov con un  $\alpha= 0,05$ , en donde el valor p para el test de AD da un valor  $<0,005$  y para el test de KS el valor p es  $<0,010$  (como se puede observar en la tabla 3-1) ambos resultados para todas las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, por lo que se rechaza la hipótesis de nulidad y se acepta  $H_1$ , entonces se puede afirmar, con un 95% de confianza, que los datos de registros de mediciones de  $SO_2$  en la muestra es diferente a una distribución normal. También, se aplica un test de Levene para verificar la homocedasticidad con un  $\alpha= 0,05$ , es decir, saber si existe homogeneidad de varianza. El valor p obtenido para este test fue de 0,000 (como se puede observar en la tabla 3-3) por lo que se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$ , entonces se

puede decir, con un 95% de confianza, que las varianzas de la variable registros de mediciones de SO<sub>2</sub> no es homogénea para cada estación de monitoreo de la calidad del aire.

Al observar que los datos no son normales se les aplican las siguientes transformaciones (para ver si se ajustan a esta distribución): lognormal, raíz cuadrada e inverso multiplicativo, después, se les aplica el test de normalidad, obteniendo los mismos resultados anteriormente mencionados.

Desde la tabla 3-4 a la tabla 3-12 se pueden observar los estadísticos descriptivos para cada estación acompañado de su respectivo gráfico boxplot (gráfico de caja y bigotes) e histograma (desde el gráfico 3-10 al 3-18). Cabe destacar que los datos de medición de dióxido de azufre corresponden a la media aritmética de mediciones que se realizan durante 1 hora cada 5 minutos. Los estadísticos descriptivos se separaron por año 2016, 2017, 2018 y 2019 para cada estación. Como se puede observar, en las tablas antes mencionadas y gráficos boxplot, existen valores atípicos para cada estación los que afectan al promedio (que es la medida con la que se informan las concentraciones de dióxido de azufre), desviación estándar y varianzas. Es por esto, que los estadísticos de tendencia central antes mencionados no son la mejor opción para describir los datos y se hace a través de los 5 números de resumen que se componen de el mínimo, cuartil 1, mediana, cuartil 3 y el máximo (también el rango es una medida que se puede calcular a partir de los 5 números de resumen). Los valores de asimetría y curtosis, en todos los casos, indican que se trata de una distribución con una cola hacia la derecha “sesgo” (ya que todos los valores de asimetría son positivos) y de una forma leptocúrtica (valores de curtosis positivos, es decir, datos concentrados alrededor del promedio).

Observando los estadísticos de cada estación, específicamente el rango, se hace necesario hacer una prueba de valores atípicos “prueba de Grubbs”, para saber si son datos que provienen de la misma población normal. Desde las gráficas 3-1 a la 3-9 se realiza la prueba de Grubbs para cada estación por año con un  $\alpha = 0,05$ , en donde se obtiene un valor  $p = 0,000$  entonces se rechaza  $H_0$  y se acepta  $H_1$ , por lo que con un 95% de confianza se puede afirmar que el valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico. Es importante mencionar que los datos con los que se elabora este trabajo son datos validados por SMA, por lo que los datos son lo que indican.

El valor horario de 350  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  es agregado a la norma de calidad primaria del aire, ya que estudios realizados por la OMS y la EPA se centran en la vigilancia de los efectos agudos del SO<sub>2</sub>. Además, un estudio del CENMA indica que la actual norma no protege a las poblaciones más vulnerables, correspondiente a grupos de asmáticos, infantes y niños, ya que sus niveles permiten una alta tolerancia respecto al riesgo que se expone la población. Se fija éste valor para la protección de la salud de las personas

frente a los efectos agudos para exposiciones cortas a dióxido de azufre. Luis Díaz, doctor en Ingeniería Ambiental y experto en calidad del aire de la Universidad de Santiago dice que “el efecto del dióxido de azufre es oxidativo y es muy irritante para el ser humano, afecta las mucosas respiratorias, entonces, aunque sea menos de una hora - aunque sean 10 minutos- un alto peak de contaminación va a afectar a las personas”.

Las series temporales ayudan a visualizar las mediciones que son mayores al valor normado de  $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ . Estos gráficos están ordenados por las horas que componen cada año (2016, 2017, 2018 y 2019) y separados por cada estación de monitoreo, están comprendidos entre el gráfico 3-19 hasta el 3-27. Para la estación Puchuncaví se observa que en el año 2016 y 2018 se sobrepasa el valor normado 1 vez cada año en los meses de julio y abril a las 10:00 y 11:00 h. respectivamente, y en los años 2017 y 2019 no se sobrepasa; para la estación Los Maitenes en todos los años se sobrepasa el valor normado, en el año 2016 se sobrepasa 74 veces el valor en todos los meses y en horarios, mayormente, comprendidos entre las 08:00 y las 17:00 h., para el año 2017 se sobrepasa 63 veces la norma (no se sobrepasa solamente en el mes de junio) y los horarios en que se sobrepasa el valor es en horarios comprendidos, mayormente entre las 09:00 y las 17:00 h., en el año 2018 se sobrepasa 68 veces la norma (no se sobrepasa en el mes de julio, octubre y diciembre) y los horarios en que se sobrepasa la norma, mayormente, están comprendidos entre 08:00 y las 17:00 h., en el año 2019 se sobrepasa 21 veces (solo en el mes de enero y febrero la norma no es sobrepasada), los horarios en donde se sobrepasa están comprendidos entre las 09:00 y las 21:00 h. mayoritariamente.; en la estación Ventanas en todos los años se sobrepasa la norma, en 2016 se sobrepasa 14 veces en el año (en enero, abril, mayo junio, julio, agosto y septiembre) entre las 03:00 y las 23:00 h. mayoritariamente, en 2017 se sobrepasa solo 2 veces en febrero a las 03:00 y 04:00 h., en 2018 se sobrepasa 1 vez en septiembre a las 10:00 h., en 2019 desde marzo a septiembre se sobrepasa 75 veces entre las 07:00 a las 21:00 h.; en la estación La Greda en el año 2016 en mayo, julio y agosto se sobrepasa la norma 4 veces entre las 11:00 y las 18:00 h., en el año 2017 en febrero, abril, junio, octubre y diciembre se sobrepasa la norma 8 veces entre las 03:00 y las 20:00 h., en 2018 se sobrepasa en junio, julio, agosto y septiembre 5 veces entre las 10:00 y las 18:00 h., y en 2019 se sobrepasa solo 1 vez en agosto a las 01:00 h.; en la estación Quintero en el año 2016 se sobrepasa la norma 104 veces, exceptuando el mes de marzo, en todo horario del día, en el año 2017 se sobrepasa la norma 117, exceptuando en el mes de enero, en todo horario del día, en el año 2018 se sobrepasa la norma 70 veces, exceptuando los meses de enero, febrero y marzo, en todo horario del día, en el año 2019 se sobrepasa 92 veces, exceptuando en el mes de enero, en todo horario del día; en la estación Centro Quintero en el año 2016 se sobrepasa 25 veces el valor normado,

exceptuando los meses de abril, octubre, noviembre y diciembre en todo horario del día, en el año 2017 se sobrepasa el valor normado 48 veces, exceptuando en los meses de febrero, marzo y diciembre, en todo horario del día, en el año 2018 el valor normado se sobrepasa 20 veces en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre en todo horario del día, en el año 2019 se sobrepasa el valor normado 13 veces en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre en horarios comprendidos entre las 00:00 y las 09:00 h. mayoritariamente; en la estación Loncura en el año 2016 el valor normado se sobrepasa 148 veces en todos los meses del año y en todo horario del día, en el año 2017 el valor se sobrepasa 45 veces en todos los meses del año y en horarios entre las 09:00 y las 20:00 h., mayoritariamente, en el año 2018 se sobrepasa 33 veces en el año, exceptuando en el mes de diciembre, en horarios entre las 11:00 y las 18:00 h. mayoritariamente, en el año 2019 se sobrepasa el valor normado 3 veces en el año en los meses de febrero, junio y agosto a las 08:00 h., 01:00 h. y a las 11:00 h. respectivamente; en la estación Sur en el año 2016 se sobrepasa el valor normado 22 veces en el año, exceptuando en los meses de febrero, octubre, noviembre y diciembre, entre las 01:00 y las 12:00 h., en el año 2017 se sobrepasa el valor 18 veces en el año (exceptuando en mayo y diciembre) en horarios comprendidos mayormente entre las 00:00 y las 10:00 h., en el año 2018 se sobrepasa 10 veces en el año (en los meses de enero, febrero, abril, mayo, junio y julio) en horarios comprendidos entre las 07:00 y las 19:00 h., en el año 2019 se ha sobrepasado 7 veces el valor normado en el año (en los meses de marzo, mayo, julio y agosto) entre las 06:00 y las 13:00 h.; finalmente, en la estación Valle Alegre en el año 2016 y 2019 no se ha sobrepasa el valor normado, en el año 2017 se sobrepasa 1 vez en septiembre a las 09:00 h. y en el año 2018 se sobrepasa 2 veces, una en enero a las 08:00 h y en marzo a las 10:00 h.

Se hace un énfasis en los periodos donde se han registrado incidentes de contaminación en las Comunas de Quintero y Puchuncaví (en agosto y septiembre de 2018 y 2019) en donde se registra, según datos del SINCA y la SMA) en las estaciones de Puchuncaví y Valle Alegre no existen mediciones que sobrepasen la normativa horaria. La estación Ventanas, La Greda y Sur presentan no más de 3 excedencias cada una en los meses indicados anteriormente. La estación Los Maitenes, Loncura y Centro Quintero presentan no más de 7 mediciones excediendo el valor horario. La estación Quintero presenta para ese periodo 7 mediciones excedidas en agosto de 2018, 4 mediciones excedidas para septiembre de 2018, 2 mediciones excedidas en agosto de 2019 y 4 mediciones excedidas en septiembre de 2019. En este periodo se genera una causa penal contra ENAP y CODELCO, que está siendo investigada por el Ministerio Público, por manipulación de datos en el SINCA.

Desde el gráfico 3-28 al 3-36 se representa el comportamiento del dióxido de azufre por cada estación separado en año/mes y año/hora. En los gráficos año/mes se puede observar que no existe un patrón estacional definido comparando año a año las medianas de las concentraciones, hay meses en que este valor aumenta o disminuye, pero no parece ser replicable en los años posteriores. En los gráficos año/hora existe un patrón horario que es similar en cada año por cada estación de monitoreo de la calidad del aire. Para la estación Puchuncaví, por hora, se puede observar un patrón similar en cada año (2016 al 2019) en donde a las 07:00 comienza a aumentar la mediana de las mediciones hasta alcanzar su punto máximo entre las 10:00 y las 15:00 h., para luego comenzar a descender, aunque en la mediana de las mediciones del 2019 es menor que la de los otros años. En la estación Ventanas, por hora, se observa un patrón similar entre los años 2016 – 2018, en donde desde las 06:00 h. comienza a aumentar hasta entre las 09:00 – 10:00 h. para luego comenzar a descender y mantenerse más o menos constante, en el año 2019 se observan medianas de concentración menor que en los otros años, desde las 07:00 h. hasta las 11:00 h. se registra un incremento en los valores alcanzando su máximo, para luego descender. En la estación Los Maitenes en todos años se puede observar un comportamiento similar, en donde comienza a aumentar entre las 08:00 y las 09:00 h. para alcanzar el máximo de concentraciones entre las 11:00 y las 13:00 h., y luego comenzar a descender. En la estación La Greda los años 2016, 2019 y los años 2017 y 2018 presentar valores de medianas de concentración similares, a las 07:00 h. comienza a ascender la mediana de las concentraciones para alcanzar su punto máximo entre las 11:00 y las 12:00 h., para luego comenzar a descender. En la estación Centro Quintero entre las 03:00 y las 04:00 h. comienza ascender las medianas de las concentraciones para alcanzar su punto máximo entre las 06:00 y las 07:00 h., y luego comenzar a descender. En la estación Loncura a las 07:00 h. comienza a aumentar las medianas de las concentraciones para alcanzar su punto máximo entre las 09:00 y las 11:00 h. y luego comienza a descender. En la estación Sur desde las 00:00 h comienzan a aumentar las medianas de las concentraciones y entre las 08:00 y las 10:00 alcanza su mayor valor para luego comenzar a descender, el año 2016 es el que presenta los menores valores de las medianas. En la estación Valle Alegre desde las 07:00 h. comienzan a aumentar las medianas de las concentraciones y llegan a su valor máximo entre las 10:00 y las 12:00 h. para luego comenzar a descender. En la estación Quintero a las 22:00 h. comienzan a ascender las medianas de las concentraciones y entre las 06:00 y las 08:00 h. alcanzan su mayor valor para luego comenzar a descender. Las medidas de control de las empresas se deben reforzar en estos horarios y más aún si se activa el protocolo GEC, el cual indica las malas condiciones de la atmósfera para diluir y dispersar contaminantes, que desde que entra en vigencia el PPDA (D.S. N°105/2018 del

MMA) el 30-03-2019 se ha activado 141 veces este protocolo. En este punto cabe destacar el rol del estado en cuanto a control y seguimiento efectivo del cumplimiento, a las instituciones con competencia, primero, de las emisiones ubicadas en la bahía de Quintero – Puchuncaví y, segundo, de las acciones de control para que sean efectivas cuando se active el protocolo GEC.

El resultado del ICAGSO<sub>2</sub> se puede observar en la tabla 3-13 el cual es un índice que ayuda a la población a conocer la calidad del aire. La mayoría de los valores de todas las estaciones se encuentra en índice 0-99 (sobre el 95%), es decir, que no supera los 349 µg/m<sup>3</sup>N, exceptuando la estación Loncura que presenta sobre el 81% de datos en el mismo índice. Cuando el valor del ICAGSO<sub>2</sub> es igual o mayor a 200, es decir, cuando la concentración de SO<sub>2</sub> es mayor o igual a 500 µg/m<sup>3</sup>N o 191 ppbv se alcanzan los niveles de emergencia (estos niveles se ilustran en la tabla 2-4). En la estación Puchuncaví y Valle Alegre no se alcanzan niveles de emergencia entre los años 2016 – 2019. La estación Quintero es la que presenta la mayor cantidad de mediciones en niveles de emergencia, desde el 2016 a 2019 se evidencia una disminución de los niveles de emergencia, en 2019 solo se registran 14 estados de alerta, 4 estados de pre-emergencia y 1 de emergencia. En la estación Los Maitenes desde 2016 a 2018 aumentan los estados de emergencia, pero en 2019 solo se registran 3 estados de alerta. En la estación Centro Quintero se registra una disminución desde el año 2016 al 2019 en los niveles de emergencia, para 2019 solo se registran 2 estados de alerta y 1 de pre-emergencia. En la estación Loncura y Sur se registra una disminución desde el año 2016 al 2019 de los niveles de emergencia, para 2019 no se ha registrado ningún nivel. En la estación La Greda solo se registra 1 estado de pre-emergencia en el año 2018. En la estación Ventanas solo en 2016 se registran 3 estados de alerta y 2 de emergencia. Estos resultados del ICAGSO<sub>2</sub> difieren a los declarados por la Intendencia de Valparaíso en el punto 1.5.2.2. en el cual en el año 2019 se han declarado 5 alertas, 1 pre-emergencia y 1 emergencia ambiental y en los resultados de este trabajo se han encontrado para el mismo año 19 alertas, 5 pre-emergencias y 1 emergencia ambiental.

De acuerdo a la tabla 3-14 del resultado de los percentiles de las estaciones de monitoreo, se calcula para 1 año calendario y para 3 años (2016 – 2018). Se ordenan los datos de mayor a menor, por lo que las mediciones con mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> quedan fuera del procedimiento para calcular el percentil. Todas las estaciones cumplen con el criterio de la norma respecto al percentil. La estación que presenta el mayor percentil 99 es Centro Quintero con un valor de 472,31 µg/m<sup>3</sup>N y la estación con el menor percentil 99 es Puchuncaví con un valor de 92,91 µg/m<sup>3</sup>N. La estación con mayor percentil 98,5 es Quintero y la de menor percentil 98,5 es Puchuncaví.

Cabe destacar que las normas de calidad se deben actualizar cada 5 años según el D.S. 38/2012, pero la norma anterior de SO<sub>2</sub> data del año 2002. Recién en 2010 la norma de calidad primaria entra en revisión para que en 2015 se publicara en anteproyecto de la norma, luego en 2018 se publica el D.S. N°104, es decir, transcurrieron 16 años para su actualización.

Es una garantía constitucional que el estado vele por un medioambiente libre de contaminación. Por otro lado, gran parte de las empresas que se ubican en la bahía no cuentan con Resolución de Calificación Ambiental, por lo que no han sido evaluados por el Sistema de Evaluación Ambiental (solo 6 de las 15 empresas mencionadas en la tabla 1-9 se instalaron después del año 1994) por lo que el impacto sinérgico del complejo industrial Ventanas no ha sido considerado en su totalidad. Es importante mencionar que según el nuevo PREMVAL del año 2015 aún quedan 500 hectáreas para la construcción de industrias no nocivas, lo que hace aún más importante el seguimiento y control por parte de entes fiscalizadores.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Al finalizar este trabajo, se puede decir que se cumplen el objetivo establecidos para este trabajo.

Respecto a los datos obtenidos del SINCA se puede decir que falta la verificación de datos desde el año 2016 aproximadamente, por lo que se requiere mejorar la frecuencia con la que se verifican los datos de monitoreo de la calidad del aire. La Ley de Transparencia fue fundamental para obtenerlos.

Respecto a que la media aritmética se ve fuertemente afectada por valores atípicos, por lo que no es la mejor opción para representar las mediciones.

En cuanto a los resultados obtenidos en las series temporales se observa que en la mayoría de las estaciones de monitoreo disminuyen las mediciones que sobrepasan el valor normado ( $350 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ ), la estación Quintero presenta el mayor número de excedencias del valor normado en 2019 con 92 mediciones. La estación Ventanas es la única que no disminuye sus excedencias, en 2016 presentó 14 mediciones sobre el valor normado y en 2019 presentó 75 mediciones sobrepasada.

En el periodo agosto – septiembre de 2018 – 2019 la estación que más presenta mediciones sobre el valor normado es la estación Quintero con 11 mediciones excedidas en 2018 y 6 mediciones excedidas en 2019 con valores que fluctúan entre los 350 – 604  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$ .

Respecto al comportamiento del  $\text{SO}_2$ , no hay un patrón estacional definido que se replique año a año en las estaciones, pero si para el comportamiento horario de las mediciones. Las estaciones Quintero y Centro Quintero presentan un incremento en el nivel de las mediciones entre las 06:00 a.m. y las 08:00 a.m., las demás estaciones presentan un alza entre las 08:00 a.m. y las 12:00 p.m., por lo que las medidas de control de las empresas se deben reforzar en estos horarios y más aún si se activa el protocolo GEC.

Según el ICAGSO<sub>2</sub> se registran para las 9 estaciones de monitoreo de calidad del aire, en el año 2019, un total de 19 alertas, 5 pre-emergencias y 1 emergencia ambiental. La estación Quintero es la que más presenta estados de emergencia, según el ICAGSO<sub>2</sub> ha alcanzado para el año 2019: 14 alertas, 4 pre-emergencias y 1 emergencia ambiental.

En cuanto a los percentiles calculados, todas las estaciones se encuentran cumpliendo con el criterio normativo.

Se rechaza la hipótesis de nulidad y se acepta la hipótesis alterativa, ya que los valores de las concentraciones del dióxido de azufre son diferentes al establecido en la normativa aplicada.

Como recomendación, existe la necesidad de que el D.S. N°104/2018 del MMA indique el porcentaje mínimo para evaluar el cumplimiento de la normativa e indicar que hacer en el caso de datos faltantes no especificados según D.S. N°61/2008 del MINSAL. Además, se recomienda respetar el plazo estipulado para la revisión de normativa en el D.S. 38/2013 del MMA, es decir, 5 años, ya que al pasar del tiempo van quedando obsoletas y exponen a la población a diversos riesgos de salud por la holgura que dan los valores contenidos en la norma. En cuanto a que la media aritmética sea la que represente las mediciones de SO<sub>2</sub> podrían ser acompañadas de medidas de dispersión para tener en cuenta las variaciones en las mediciones horarias (como el mínimo, máximo, mediana, cuartil 25, cuartil 75 y rango).

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] WHO. Guía de Calidad del Aire, Organización Mundial de la Salud 2005 [en línea]  
<[https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;jsessionid=DC42ECC203B6098FBA2C2C95E700C035?sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=DC42ECC203B6098FBA2C2C95E700C035?sequence=1)>  
[consulta: 01 agosto 2019]
- [2] OROZCO, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., & Alfayate, J. (2011). Contaminación ambiental: una visión desde la química. Paraninfo.
- [3] LEY 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente [en línea]  
<<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667>> [consulta: 01 agosto 2019]
- [4] MMA. Planes de descontaminación atmosférica 2014-2018 [en línea]  
<[https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/08/articles-56174\\_Plan\\_Descont\\_Atmosferica\\_2014\\_2018.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2014/08/articles-56174_Plan_Descont_Atmosferica_2014_2018.pdf)> [consulta: 01 agosto 2019]
- [5] MMA, Guía de Calidad del Aire para Docentes, 2018 [en línea]  
<<https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/08/Guia-para-Docentes-Sobre-Calidad-del-Aire-003.pdf>> [consulta: 05 agosto 2019]
- [6] LENNTECH. Metales pesados [en línea]  
<<http://www.lenntech.es/metales-pesados.htm>> [consulta: 10 agosto 2019]
- [7] ATSDR. Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [en línea]  
<[http://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/plomo/es\\_pb-normas.html](http://www.atsdr.cdc.gov/es/csem/plomo/es_pb-normas.html)> [consulta: 10 agosto 2019]
- [8] SMITH, T. M., & SMITH, R. L. (2007). Ecología. PEARSON.
- [9] UC.CL. Brisas Tierra-Mar [en línea]  
<[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/contam/atm/atm271.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/atm/atm271.htm)> [consulta: 15 agosto 2019]
- [10] UC.CL. Brisas Valle-Montaña [en línea]  
<[http://www7.uc.cl/sw\\_educ/contam/atm/atm28.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/contam/atm/atm28.htm)> [consulta: 15 agosto 2019]

- [11] PAHO.ORG. Gradiente Adiabático [en línea]  
<[http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_meteoro/lecc4/lecc4\\_1.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/lecc4/lecc4_1.html)> [consulta 16 agosto 2019]
- [12] GASH, Gradiente Adiabático Seco y Húmedo [en línea]  
<[https://fjerrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/1\\_tasas\\_de\\_cambio\\_adiabtico.html](https://fjerrer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion03/1_tasas_de_cambio_adiabtico.html)>  
[consulta: 16 agosto 2019]
- [13] OECD. Indicador Ambiental: exposición a contaminación del aire [en línea]  
<<https://data.oecd.org/air/air-pollution-exposure.htm>> [consulta 20 agosto 2019]
- [14] MMA. Desarrollo Histórico de Quintero y Puchuncaví [en línea]  
<[https://pras.mma.gob.cl/desarrollo\\_historico\\_ventanas/](https://pras.mma.gob.cl/desarrollo_historico_ventanas/)> [consulta 03 septiembre 2019]
- [15] SINCA.MMA. Estaciones de monitoreo de calidad del aire Región de Valparaíso [en línea]  
<<https://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/V>> [consulta 27 septiembre 2019]
- [16] SEA. Normativa Ambiental Aplicable [en línea]  
<<https://www.sea.gob.cl/documentacion/permisos-autorizaciones-ambientales/normativa-ambiental-aplicable>> [consulta 01 octubre 2019]
- [17] DECRETO Supremo N°104 establece Norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>). Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, 16 de mayo de 2019.
- [18] SNIFA.SMA. Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica [en línea]  
< <http://snifa.sma.gob.cl/v2/Instrumento/Tipo/4>> [consulta 01 octubre 2019]
- [19] PPDA.MMA. Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica Quintero, Puchuncaví y Concón [en línea]  
<<https://ppda.mma.gob.cl/valparaiso/ppda-concon-quintero-puchuncavi/#ffs-tabbed-12>>  
[consulta 04 octubre 2019]
- [20] HERNÁNDEZ, Sampieri, R., Fernández, Collado, C., & Baptista, Lucio, P. (2010). Metodología de la investigación. Mc Graw Hill.

**ANEXOS**

Anexo 1: Carta Gantt de trabajo de titulación

Carta Gantt																														
Plan de acción trabajo de titulación																														
Mes	Agosto					Septiembre					Octubre					Noviembre					Diciembre					Enero				
Semana	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1. Introducción al tema y recopilación de información del SINCA y fuentes bibliográficas	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																		
Búsqueda, recopilación y revisión de material bibliográfico	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█	█																		
Definición del alcance y objetivos del tema	█	█	█																											
Realización del borrador de los principales tópicos	█	█	█																											
<b>2. Desarrollo del trabajo</b>																														
Definir índice general				█																										
Realizar capítulo 1 sobre antecedentes				█	█																									
Realizar capítulo 2 sobre marco normativo							█	█	█																					
<b>PRESENTACIÓN N°1</b>																														
Corrección título, alcance y otros												█	█	█																
<b>3. Análisis de los datos</b>																														
Representación de la información estadística ambiental del SINCA												█	█	█	█															
Comparación y análisis de los datos																	█	█	█	█										
<b>4. Discusión</b>																														
<b>5. Conclusiones</b>																														
<b>6. Revisión y finalización del escrito</b>																														
<b>PRESENTACIÓN N°2</b>																														
Corrección y preparación examen																														
<b>EXAMEN DE TITULACIÓN</b>																														

Fuente: elaboración propia a partir de planificación personal del trabajo de titulación