



**UNIVERSIDAD DE CHILE
ESCUELA DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**

Evaluación de riesgos a la salud humana y vegetal debido a la presencia atmosférica de contaminantes MP_{10} , $MP_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 y elementos traza en la cuenca del Aconcagua, Chile.

Tesis para optar al grado de Magister en Gestión y Planificación Ambiental

VÍCTOR ANDRÉS CALDERÓN ESPINOZA

Directora de Tesis:

MARGARITA PRENDEZ BOLÍVAR

Santiago, Chile 2011



**UNIVERSIDAD DE CHILE
ESCUELA DE POSTGRADO Y POSTÍTULO
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA**

Evaluación de riesgos a la salud humana y vegetacional debido a la presencia atmosférica de contaminantes MP_{10} , $MP_{2,5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 y elementos traza en la cuenca del Aconcagua, Chile.

VÍCTOR ANDRÉS CALDERÓN ESPINOZA

Directora de Tesis:

Margarita Prendez Bolívar

COMISION DE EVALUACION

Presidente:

Carmen Luz De La Maza Asquet

Profesores Informantes:

M. Adriana Carrasco Rimassa

Raúl Morales Segura

Santiago, Chile 2011



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza
Programa Inter facultades, Magister en Gestión y Planificación Ambiental

Agradecimiento

A través de estas palabras quisiera agradecer a los profesionales de la ex CONAMA, Región de Valparaíso, por facilitar la información pública que fue utilizada en este trabajo.

Agradezco el apoyo logístico brindado por Víctor, mi padre, en el trabajo en terreno. Juntos recorrimos los rincones del valle del Aconcagua.

También agradezco el apoyo crucial a Yasmín, mi compañera.

Finalmente mis agradecimientos a la Dra. Margarita Prendez, por su constante guía y revisión de los contenidos de este trabajo.

Víctor Andrés Calderón Espinoza



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1. Dióxido de azufre, SO ₂	5
3.2. Dióxido de nitrógeno, NO ₂	5
3.3. Ozono, O ₃	7
3.4. Material Particulado	7
3.5. Elementos Traza	8
3.6. Normas y recomendaciones sobre calidad de aire	12
3.7. Gestión de la calidad del aire en Chile	16
4. MATERIALES Y MÉTODO	18
4.1. Área de estudio	18
4.2. Análisis de la meteorología de superficie	19
4.3. Informes de monitoreo de calidad de aire	19
4.4. Evaluación de los contaminantes NO ₂ , O ₃ , SO ₂ , MP ₁₀ , MP _{2,5}	21
4.5. Emisiones atmosféricas	21
4.6. Evaluación de los análisis químicos de filtros de MP ₁₀	22
4.7. Evaluación de riesgos	24
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
5.1. Meteorología del área de estudio	29
5.2. Comportamiento de los contaminantes	42
5.3. Emisiones atmosféricas	74
5.4. Concentraciones de elementos traza en el MP ₁₀ y sus tendencias durante el periodo 1998-2008	77



5.5. Enriquecimiento de los elementos traza	87
5.6. Análisis estadístico por correlaciones binarias y múltiples para los elementos traza	88
6. EVALUACIÓN DE RIESGO	96
6.1. Niveles de riesgo asociado a MP_{10}	97
6.2. Niveles de riesgo asociado a SO_2	97
6.3. Niveles de riesgo asociado a NO_2	99
6.4. Niveles de riesgo asociado a O_3	101
7. CONCLUSIONES	104
8. RECOMENDACIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	109
ANEXOS	
Anexo 1. Normas de emisión aplicables al componente aire.	114
Anexo 2. Antecedentes sobre las estaciones monitoras y métodos de medición empleados.	116
Anexo 3. Períodos de medición evaluados en el área de estudio	123



ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Normas de calidad en Chile para SO ₂ y límites recomendados por la OMS	13
Cuadro 2.	Norma de calidad en Chile para NO ₂ y límites recomendados por la OMS	13
Cuadro 3.	Normas de calidad en Chile para O ₃ y límites recomendados por la OMS	14
Cuadro 4.	Norma de calidad para MP ₁₀ y MP _{2,5} en Chile y límites recomendados por la OMS	15
Cuadro 5.	Norma de calidad para elementos traza en Chile, la CEE y límites recomendados por la OMS	16
Cuadro 6.	Registros diarios y horarios de calidad del aire evaluados en la zona de estudio	21
Cuadro 7.	Representatividad de las mediciones de elementos traza en el MP ₁₀ , según porcentaje de mediciones superiores al límite de detección respectivo.	22
Cuadro 8.	Composición promedio de elementos traza en la corteza terrestre y en los suelos de la zona de estudio	23
Cuadro 9.	Matriz multicriterio aplicada a enfoque de riesgo a la salud de la población	38
Cuadro 10.	Matriz multicriterio aplicada a enfoque de riesgo a la salud de la vegetación	27
Cuadro 11.	Jerarquización de riesgos	28
Cuadro 12.	Correlaciones de Pearson de las concentraciones diarias de No ₂ entre las estaciones y número de observaciones (N)	48
Cuadro 13.	Resultado análisis estadístico PCA, Estación Concón urbana fija – Santa Margarita	56
Cuadro 14.	Concentraciones promedio de elementos traza en el MP ₁₀ (ng/m ³) para el periodo 1999-2008	84
Cuadro 15.	Factor de enriquecimiento en el área de estudio de acuerdo a la composición de la corteza terrestre	87
Cuadro 16.	Factor de enriquecimiento en el área de estudio de acuerdo a la composición del suelo	88
Cuadro 17.	Análisis de componentes principales, Estación Concón – Santa Margarita, periodo 2002 - 2008	89



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza
Programa Inter facultades, Magister en Gestión y Planificación Ambiental

Cuadro 18.	Análisis de componentes principales, Estación Concón Sur, periodo 2002 - 2008	90
Cuadro 19.	Análisis de componentes principales, Estación Colmo, periodo 2002 - 2008	90
Cuadro 20.	Análisis de componentes principales, Estación La Calera, periodo 1999 - 2008	92
Cuadro 21.	Análisis de componentes principales, Estación Hijuelas, periodo 1999 - 2001	92
Cuadro 22.	Análisis de componentes principales, Estación Rural 1 , periodo 2005 - 2007	93
Cuadro 23.	Análisis de componentes principales, Estación Catemu, periodo 2000 - 2007	94
Cuadro 24.	Análisis de componentes principales, Estación Lo Campo, periodo 2000 - 2007	95
Cuadro 25.	Niveles de riesgo sanitario y ambiental para contaminantes MP_{10} , SO_2 , NO_2 , O_3	96



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Localización de las estaciones de monitoreo en la zona de estudio	19
Figura 2.	Puntos de muestreos de estudios de suelo, sector intermedio del Valle del Aconcagua	24
Figura 3.	Puntos de muestreos de estudios de suelo, sector Catemu	24
Figura 4.	Ciclo diario de la radiación solar horaria promedio para los años 2004 y 2007	29
Figura 5.	Ciclo diario de la radiación solar horaria promedio para los meses de enero y julio de los años 2004 y 2007	30
Figura 6.	Ciclo diario de la temperatura mensual promedio para los años 1998 - 2008	31
Figura 7.	Ciclo diario de la temperatura horaria promedio para el año 2005	32
Figura 8.	Ciclo diario de la temperatura horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2005	33
Figura 9.	Precipitación mensual en las estaciones de la red de Nehuenco para los años 2006 al 2007	34
Figura 10.	Ciclo diario de la velocidad del viento horaria promedio para el año 2006	35
Figura 11.	Ciclo diario de la velocidad del viento horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2006	35
Figura 12.	Ciclo diario de la dirección del viento horaria promedio para el año 2006	36
Figura 13.	Desplazamientos de los vientos área de estudio: a) Concón; b) Quillota, La Cruz	37
Figura 14.	Desplazamientos de los vientos área de estudio: a) La Calera; b) Llay Llay, Catemu	38
Figura 15.	Ciclo diario de la humedad relativa horaria promedio para el año 2005	39
Figura 16.	Ciclo diario de la humedad relativa horaria promedio para los meses de enero y Julio del año 2005	40
Figura 17.	Cuenca del río Aconcagua: Sub Zonas Meteorológicas	42
Figura 18.	Ciclo diario de las concentraciones NO ₂ horaria promedio para los años 1998 al 2008	43
Figura 19.	Ciclo diario de la concentración NO ₂ horaria promedio para el año 2006	44
Figura 20.	Ciclo diario de la concentración NO ₂ horaria promedio para los días	45



miércoles y domingo para los años 1998 al 2008.

Figura 21.	Ciclo diario de la concentración NO_2 : mensual promedio para el periodo comprendido entre los años 1998 – 2008.	46
Figura 22.	Concentración NO_2 promedio mensuales para el año 2006.	47
Figura 23.	Concentración NO_2 trianual promedio para los años 2001 al 2008	49
Figura 24.	Concentración NO_2 promedio trianual del percentil 99 horario para los años 2001 al 2008	50
Figura 25.	Concentración NO_2 promedios diarios para el año 2006	51
Figura 26.	Ciclo diario de la concentración O_3 horaria promedio para los años 1998 al 2008	52
Figura 27.	Ciclo diario de la concentración O_3 horaria promedio para el año 2006.	53
Figura 28.	Ciclo diario de la concentración O_3 horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2006	53
Figura 29.	Ciclo diario de la concentración $\text{O}_3 - \text{NO} - \text{NO}_2$ horaria promedio para el mes de enero del año 2006	54
Figura 30.	Ciclo diario de la concentración HCT horaria promedio para el año 2006.	55
Figura 31.	Concentración O_3 promedio trianual del percentil 99 de 8 horas para los años 2001 al 2008	57
Figura 32.	Concentración O_3 del indicador AOT40 – 5 días los años 1998 al 2008	58
Figura 33.	Concentración O_3 del indicador AOT40 – 3 meses para los años 1998 al 2008	58
Figura 34.	Concentración O_3 del indicador AOT40 – 6 meses para los años 1998 al 2008	59
Figura 35.	Ciclo diario de concentración SO_2 horaria promedio para el periodo entre los años 1998 - 2008	60
Figura 36.	Ciclo diario de concentración SO_2 horaria promedio para el año 2006.	61
Figura 37.	Ciclo diario de la concentración SO_2 horaria promedio para los meses de enero, abril, julio y octubre del año 2006	63
Figura 38.	Ciclo diario de la concentración mensual promedio de SO_2 para los años 1998 al 2008	64
Figura 39.	Concentración SO_2 trianual promedio para los años 2001 al 2008	65
Figura 40.	Concentración SO_2 promedio trianual percentil 99 diario para los años 2001 al 2008	65



Figura 41.	Concentración SO_2 de los máximos promedios diarios para los años 1998 al 2007	66
Figura 42.	Número de eventos de superación del promedio horario límite para la norma secundaria de SO_2 para los años 1999 al 2008	67
Figura 43.	Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de monitoreo de Chagres para los años 2000 al 2007	68
Figura 44.	Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días para los años 1998 al 2000 y entre 2004 al 2007 en las estaciones de monitoreo de la red Nehuenco – San Isidro	69
Figura 45.	Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de monitoreo Cemento Melón para los años 1998 al 2008	70
Figura 46.	Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de monitoreo de Enap para los años 2000 al 2008	70
Figura 47.	Distribución de frecuencia de concentración de MP_{10} a) La Calera y b) Catemu	71
Figura 48.	Concentración MP_{10} trianual promedio para los años 2002 al 2008	72
Figura 49.	Concentración MP_{10} promedio anual del percentil 98 diario para los años 1999 al 2008	73
Figura 50.	Concentración $MP_{2.5}$ trianual promedio para los años 2002 al 2007	74
Figura 51.	Emisiones de SO_x , NO_x , PTS y COV por comunas para el año 2006	75
Figura 52.	Emisiones de SO_x (a) y NO_x (b) por establecimiento para el año 2006	75
Figura 53.	Emisiones de PTS (a) y COV (b) por establecimiento para el año 2006	77
Figura 54.	Concentraciones anuales de de As y Cu en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo del área de estudio	78
Figura 55.	Concentraciones de Cd, Hg y Mo en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo del área de estudio	79
Figura 56.	Concentraciones de V, Ti y Mn en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo del área de estudio	81
Figura 57.	Concentraciones de Sb, Ni y Cr en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo del área de estudio	82
Figura 58.	Concentraciones de Pb y Zn en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo del área de estudio	83
Figura 59.	Distribución porcentual de elementos traza en el MP_{10} : Estaciones de monitoreo: a) Colmo; b) Concón- Santa. Margarita y c) Concón Sur.	85



Figura 60.	Distribución porcentual de elementos traza en el MP ₁₀ : Estaciones de monitoreo a) Hijuelas; b) La Calera y c) Rural 1	86
Figura 61.	Distribución porcentual de elementos traza en el MP ₁₀ : Estaciones de monitoreo: a) Catemu y b) Lo Campo.	87
Figura 62.	Mapa de riesgo a la salud de la población asociado al material particulado, MP ₁₀	97
Figura 63.	Mapa de riesgo a la salud de la población asociado al dióxido de azufre, SO ₂	98
Figura 64.	Mapa de riesgo para la vegetación y cultivos asociado al dióxido de azufre, SO ₂	99
Figura 65.	Mapa de riesgo a la salud de la población asociado al dióxido de nitrógeno, NO ₂	100
Figura 66.	Mapa de riesgo para la vegetación y cultivos asociado al dióxido de nitrógeno, NO ₂	101
Figura 67.	Mapa de riesgo a la salud de la población asociado al ozono, O ₃	102
Figura 68.	Mapa de riesgo para la vegetación y cultivos asociado al ozono, O ₃	103



RESUMEN

El área de estudio corresponde a la cuenca del Aconcagua, específicamente a las comunas de: Concón en la provincia de Valparaíso, Quillota, La Cruz, La Calera, Nogales e Hijuelas en la provincia de Quillota, Llay Llay, Catemu y Panquehue en la provincia de San Felipe y Limache en la provincia del Marga Marga. El área se encuentra inserta en la llamada macrozona central de Chile, que presenta un sostenido crecimiento económico, coexistiendo diversas actividades, entre las que se destacan la actividad frutícola y la industrial.

En la zona se localizan importantes fuentes industriales emisoras de partículas y gases contaminantes; destacan la generación de energía eléctrica, la producción de cemento, la refinación de petróleo y la fundición de cobre, las cuales han visto expandir sus proyectos y modificar sus tecnologías e insumos.

Este estudio tiene por objeto realizar un análisis de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos SO_2 , NO_2 , O_3 , MP_{10} , $MP_{2,5}$ y algunos elementos traza, metálicos y metaloides, presentes en el MP_{10} , y a partir de ellas obtener una aproximación sobre los riesgos a la salud de la población y de la vegetación expuestos a dichas concentraciones.

El método de trabajo significó la revisión de los informes mensuales de calidad del aire y de meteorología de los años 1998 a 2008, obtenidos de las redes de monitoreo de calidad de aire reguladas por la autoridad ambiental y sanitaria; los datos fueron analizados obteniéndose información del comportamiento que presenta cada uno de los contaminantes en escala temporal y espacial, siendo posteriormente evaluado respecto a las normas y recomendaciones primarias y secundarias nacionales e internacionales.

La información obtenida producto del análisis, se utilizó para elaborar una evaluación del riesgo de carácter cualitativo. Para ello se diseñó una matriz multicriterio incorporando distintos factores asociados a un enfoque de riesgo (magnitud de emisión por comuna, distancia a la fuente más cercana, población involucrada, vegetación involucrada, estado y tendencia de la calidad del aire, condiciones meteorológicas y certidumbre de los datos). Con la finalidad de interpretar los datos en escala espacial y facilitar la discusión se utilizó el Sistema de Información Geográfica ARCGIS 9.1.

Las tendencias observadas para los contaminantes estudiados: NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} y $MP_{2,5}$, no permiten concluir la presencia de un proceso general y extendido de deterioro de la calidad del aire en el área de estudio. Más bien se observan tendencias diferenciadas según el tipo de contaminante y la zona específica impactada. No obstante, existe una brecha importante entre los límites normados en Chile y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), por lo que en ningún caso se puede desestimar la presencia de riesgos a la salud de la población y la vegetación en la zona de estudio. Dichos riesgos se encuentran ponderados y zonificados en este estudio.

Un proceso de análisis similar al efectuado en este estudio podría desarrollarse para otras cuencas del país que cuenten con la información de base necesaria.



ABSTRACT

The study area corresponds to the Aconcagua basin, specifically the communes of: Concón in the province of Valparaíso; Quillota, La Cruz, La Calera, Nogales and Hijuelas in Quillota's province; Llay Llay, Catemu and Panquehue in the province of San Felipe and Limache in the province of Marga Marga. That area is inserted in the zone called "Central Macrozone of Chile" which presents permanent economic growth. In this area coexisting diverse activities, for example agricultural production and industrial activity. In the zone there are located industrial sources of pollutant particles and gases, from next energy productive sector: power plants, production of cement, refining of oil and smelting copper which have expanded its projects and modified its technologies and fuels.

The main object of the study is analyze the atmospheric concentrations of SO_2 , NO_2 , O_3 , MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$ and some metallic and metalloids present in the MP_{10} in order to obtain an approximation to the risks to both, population and vegetation health, exposed to those concentrations. To get this analysis, it was checked the monthly reports of air quality and meteorology between 1998 - 2008, obtained of the networks of air quality monitoring regulated both by the environmental and sanitary authority, this information was analyzed to obtain information of the behavior of each pollutant present in a temporary and in a spatial scale, being them evaluated with regard to the primary standards and secondary standards and the international recommendations. The analysis product obtained was used for elaborating a qualitative evaluation of the risk. It was designed a multicriterion matrix that includes various factors associated with an risk approach (magnitude of emission for commune, distance to the most nearest source, population and vegetation exposed, condition and trend of air quality, meteorological conditions and precision of the information). With the purpose to interpret the information in spatial scale and make easier the discussion of the results it was used the software ARCGIS 9.1.

The trends observed for the studied pollutants NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} and $\text{MP}_{2.5}$, do not allow to conclude the presence of a general and widespread process of damage of the air quality in the area of study. Rather are observed differentiated trends according to the type of pollutant and the specific impacted zone. Nevertheless an important gap exists between the standards in Chile and the recommendations of the World Health Organization (WHO), for what in any case it is not possible to scorn the presence of risks to the health of the population and the vegetation in the zone of study. The risks are weighted and divided into zones in this study.

A similar process of analysis used in this study could be develop for other basins of the country that possess the necessary base of information.



1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del Aconcagua, específicamente las comunas de: Concón en la provincia de Valparaíso, Quillota, La Cruz, La Calera, Nogales e Hijuelas en la provincia de Quillota, Llay Llay, Catemu y Panquehue en la provincia de San Felipe y Limache en la provincia del Marga Marga, es una zona relevante para el desarrollo económico de la Región de Valparaíso y del país.

Sin embargo, la presión antropogénica que ha provocado su sostenido crecimiento, ha provocado que la calidad ambiental y en especial la calidad del aire se constituya en un tema sensible para el sector productivo agro-industrial presente en la zona, las autoridades y la comunidad.

En la zona se localizan importantes fuentes industriales emisoras de partículas y gases contaminantes, principalmente en el área de la generación energética, producción de cemento, refinación de petróleo y fundición de cobre.

La zona de estudio presenta importantes centros poblados, tales como las ciudades de Concón, Quillota, La Cruz, La Calera, Llay Llay y Catemu. De acuerdo al Censo 2002 la Provincia de Quillota alcanzaba a los 175.917 Habitantes, mientras que la provincia de San Felipe alcanzaba los 131.911 Habitantes. Destacan en las provincias de Quillota y San Felipe la actividad frutícola, especialmente la producción de palta, cítricos y vides. Para la provincia de Quillota el principal mercado para paltas son EEUU y Holanda y para las naranjas EEUU y Corea del Sur (ASIVA, 2011). Como antecedente del estado de la calidad del aire en la zona se tiene el estudio Diagnóstico Integral de la Contaminación Atmosférica en la Macrozona Central de Chile (CENMA, 2001), que concluye que los principales problemas de la calidad del aire de la zona radicaban en las altas concentraciones de material particulado respirable y en la alta concentración de O₃ en la comuna de Hijuelas.

En la última década las fuentes emisoras industriales de la zona han expandido sus proyectos y modificado sus procesos productivos, lo que sumado al reemplazo energético provocado por la escasez de gas natural y el encarecimiento de los combustibles, factores que han inducido el uso de petróleo diesel, carbón de petróleo (petcoke) y combustibles alternativos, configuran un escenario desfavorable para la calidad del aire y por ende para la salud de la población y la vegetación. Paralelamente, producto de compromisos estipulados en las evaluaciones ambientales de proyectos se ha generado una base de información ambiental recolectada de una vasta red de monitoreo de la calidad del aire, cuya data corresponde en algunos casos a una década de mediciones.

De acuerdo a la información de la OMS (2006), diversos estudios epidemiológicos evidencian los efectos perjudiciales para la salud que tiene la exposición al MP₁₀ y algunos elementos traza presentes en él, tales como As y Pb, entre otros, así como también la exposición a gases tales como SO₂, NO_x y O₃. De acuerdo a lo expuesto reviste importancia abordar desde un enfoque de riesgo, el estado de la calidad del aire y los potenciales efectos a los que se exponen los habitantes y la vegetación, particularmente los cultivos de exportación, entre los que se cuentan paltos, cítricos y vides.



2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Evaluar los riesgos a los que están expuestos los habitantes y la vegetación de la cuenca del Aconcagua debido a la exposición de los contaminantes atmosféricos: SO_2 , NO_2 , O_3 , MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$ y algunos elementos traza presentes en el MP_{10} .

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar niveles de calidad del aire y su evolución en una década, para los contaminantes atmosféricos MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$, SO_2 , NO_2 y O_3 en la cuenca del Aconcagua tomando como referencia las normas primarias y secundarias nacionales, así como también los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Evaluar y zonificar cualitativamente los riesgos a los que están expuestos los habitantes y la vegetación de la cuenca del Aconcagua, por la exposición a concentraciones de SO_2 , NO_2 , O_3 , MP_{10} .
- Evaluar los niveles de concentración de algunos elementos traza presentes en el MP_{10} , en relación a: normativas nacionales, internacionales y de la OMS, su origen y potenciales fuentes emisoras.

2.3 Hipótesis General

La calidad del aire en el área de estudio ha experimentado en la última década un proceso general y extendido de deterioro, que se manifiesta en tendencias ascendentes en las concentraciones de los contaminantes NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, de origen industrial, las que ponen en riesgo la salud de la población y de la vegetación de la zona.

2.4 Hipótesis Específicas

- Las principales fuentes antropogénicas de los contaminantes NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, corresponden a fuentes puntuales de origen industrial asociadas a las actividades de producción de cemento, fundiciones de cobre, centrales termoeléctricas y refinación de petróleo, siendo menor la participación de otras fuentes urbanas y agrícolas.
- Las emisiones de SO_2 y As de la fundición Chagres tienen un impacto directo en la zona urbana y agrícola de Catemu y Panquehue.
- La sustitución del gas natural (GNC) por petróleo diesel en las centrales termoeléctricas de Quillota se encuentra directamente relacionado con un incremento en las concentraciones de NO_2 y O_3 , y el consiguiente impacto en los cultivos vegetales de la zona.
- La presencia de MP_{10} y elementos traza tales como As, Pb, Cr, Zn y Ni en La Calera es atribuible a la utilización de carbón de petróleo y combustibles alternativos en los hornos de cemento, que pueden alcanzar niveles perniciosos para la salud de la población sensible.



3. MARCO TEÓRICO

La atmósfera es la “envoltura” gaseosa que circunda el planeta cuyo espesor apenas es el 1,5% de radio de la Tierra (6.300 km) con una masa total de 5×10^{21} g; está constituida principalmente por un 78% nitrógeno molecular (N_2) y casi 21% oxígeno molecular (O_2), además de 0,9% de argón (Ar), y niveles traza de dióxido de carbono (CO_2) y otras especies que definen las propiedades químicas y radiativas de la atmósfera y las que interconectan los sistemas bióticos y abióticos estableciendo las condiciones para la vida (Gallardo, 2006). La concentración en la atmósfera de estas trazas se ha visto alterada por las actividades humanas generando procesos de contaminación a diversas escalas espaciales y temporales. La contaminación atmosférica de las ciudades es uno de los principales problemas de salud pública que aqueja a los países desarrollados y en vías de desarrollo del mundo (Matus y Lucero, 2002).

El uso de los combustibles y otras actividades industriales es la principal causa de contaminación. Es conocido que grandes cantidades de contaminantes incluyendo SO_2 son emitidos por procesos de combustión del carbón (Hang Thi Nguyen, 2006). Los altos niveles de contaminación observados en grandes ciudades del mundo tienen consecuencias bien documentadas sobre la salud de población (Gramsch et al, 2006).

Con el objeto de proteger la salud de la población en Chile se han establecido normas primarias de calidad del aire para los contaminantes criterio: SO_2 , NO_2 , MP_{10} , O_3 , CO, además de una norma para el Pb presente en el MP_{10} . No ha ido a la par el proceso de establecer normas para la protección de especies vegetales y ecosistemas. Sólo están normados el SO_2 y el material particulado sedimentable (diámetro aerodinámico superior a $45 \mu m$); este último sólo rige en la cuenca del Huasco en la región de Atacama. La legislación chilena a través de la Resolución 1215 de 1978 del Servicio Nacional de Salud, una de las primeras regulaciones en la materia, define contaminación atmosférica como *“la presencia en el aire de uno o más contaminantes, o cualquier combinación de ellos, en concentraciones o niveles tales que perjudiquen o molesten la vida, la salud y el bienestar humano, la flora y la fauna, o degraden la calidad del aire, de los bienes, de los recursos nacionales o de los particulares”*.

Cuando un contaminante entra al ambiente atmosférico, su comportamiento dependerá de factores tales como su naturaleza química, características fisicoquímicas, cantidad y frecuencia de emisión, presencia de otras sustancias en el medio e interacciones con dichas sustancias (Gavett et al., 1997). Se suma a lo anterior la incidencia de factores meteorológicos tales como temperatura, humedad, radiación solar, presión atmosférica y régimen de vientos, los cuales se manifiestan por ejemplo en variaciones diarias y estacionales de la altura de la capa de inversión térmica, que en cuencas como la metropolitana por citar un ejemplo, varían entre los 300 m en invierno y 2000 a 3000 m en verano (Ruthland y Garreaud, 1995).



Las vías a través de las cuales los contaminantes que ingresan a la atmósfera son continuamente removidos hacia otros componentes ambientales, se pueden agrupar de forma diferenciada para gases y partículas. Las vías de transferencia de gases desde la atmósfera a otros componentes ambientales son la precipitación húmeda, las reacciones químicas en la atmósfera para producir aerosol y/o absorción en aerosoles, que posteriormente son removidos y la absorción ó reacción en la superficie de suelos, vegetación y océanos. Las vías de transferencia de partículas son la remoción húmeda por precipitación y la remoción seca por sedimentación, impactación y difusión (RANA, 2006).

De acuerdo a su origen, los contaminantes atmosféricos se pueden dividir en dos categorías, los contaminantes primarios y los secundarios. Los primarios son emitidos directamente desde sus fuentes. Los secundarios se forman por la interacción de contaminantes primarios y gases y/o partículas presentes en la atmósfera, generados mediante una serie de reacciones químicas (hidrólisis, oxidación) y fotoquímicas condicionadas por factores tales como la radiación solar, la meteorología y la topografía.

De los contaminantes presentes en la atmósfera sólo una pequeña parte se presenta en concentraciones cuyos órdenes de magnitud (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y efectos en receptores humanos y vegetales, les hacen ser de interés regulatorio. Entre estos se cuentan, MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$ (material particulado de diámetro aerodinámico inferior a $2,5 \mu\text{m}$), SO_2 , NO_x , CO y O_3 . Son contaminantes relevantes la familia de los hidrocarburos tales como: metano (que representa entre el 40%-80% de los hidrocarburos presentes en la atmósfera urbana), los alquenos y acetilenos, los hidrocarburos aromáticos tales como el benceno, tolueno y xileno, y los terpenos que son hidrocarburos volátiles emitidos de fuentes naturales (biogénicos), todos ellos agrupados en la familia de los Hidrocarburos No Metánicos (HCNM). Ciertos tipos de HCNM reaccionan en presencia de radiación solar con los óxidos de nitrógeno (NO_x) encadenando una serie de reacciones que forman oxidantes fotoquímicos tales como el O_3 y los peroxiacil nitratos (PANs) (RANA, 2006).

Especial interés merecen los contaminantes de origen antropogénico. Las fuentes pueden ser diversas, aunque las principales son los procesos refinación de cobre y de combustión de carbón y derivados del petróleo desde actividades industriales tales como generación termoeléctrica, refinación del petróleo, industrias cementeras, actividades de transporte, actividades agrícolas como el control de heladas y actividades domésticas como la calefacción intradomiciliaria. Los contaminantes en la atmósfera pueden actuar a escalas espaciales y temporales diversas. El tiempo de recambio de un contaminante emitido desde una fuente puede variar de horas a años. El alcance de los contaminantes bajo ciertas condiciones de ventilación puede ir de escalas espaciales locales a regionales e incluso globales. Dada la importancia que revisten para este estudio algunos contaminantes tales como el material particulado (MP_{10} y $\text{MP}_{2,5}$), SO_2 , NO_2 , y O_3 , a continuación se describen algunas de sus características, comportamiento en el medio atmosférico, efectos en la salud humana y en la vegetación, además de los alcances regulatorios.



3.1. Dióxido de azufre, SO₂

El más importante de los contaminantes derivados del azufre es el SO₂, gas incoloro, cuyo olor provoca una sensación picante en las fosas nasales y garganta (RANA, 2006). Se produce por la combustión de los derivados del petróleo y carbón, los que contienen compuestos orgánicos azufrados (Vega de Kuyper, 2002). Las refinerías de cobre que tratan concentrados de sulfuros de cobre en sus hornos y convertidores emiten también importante cuantía de SO₂ (Vega de Kuyper, 2002). El SO₂ se oxida en la atmósfera a SO₃ el cual se combina de forma rápida con el vapor de agua presente para formar H₂SO₄ que se condensa formando niebla de H₂SO₄. Su remoción desde la atmósfera puede ocurrir a través de la precipitación húmeda y/o a través de la precipitación en forma de aerosol secundario ó sulfatos (RANA, 2006).

La formación de gotitas ácidas en la atmósfera puede catalizarse por la presencia de sales, como NaCl, por ejemplo, presente en partículas de procedencia oceánica y óxidos metálicos tales como MgO, Fe₂O₃, ZnO y Mn₂O₃ presentes en las cenizas volantes emitidas en procesos de combustión. La humedad, al igual que la precipitación húmeda (lluvias o lloviznas) juega un rol importante en la remoción del SO₂ de la atmósfera y con ello en la disminución de las concentraciones de este gas. No obstante, este proceso natural de remoción del SO₂ de la atmósfera y la formación de H₂SO₄ de características corrosivas, afecta otros componentes ambientales, tales como el suelo, las viviendas, los cultivos agrícolas y las aguas superficiales, entre otros (RANA, 2006), cabe indicar que la lluvia ácida puede modificar el pH del suelo y ocasionar intoxicación por Al en algunos cultivos.

La presencia en altas concentraciones de SO₂ provoca efectos en el corto plazo en personas con problemas respiratorios, sin perjuicio de la sensibilidad que experimenta la población en general. Estudios realizados con asmáticos que hacían ejercicio muestran en algunos de ellos cambios en la función pulmonar y síntomas respiratorios tras períodos de exposición al SO₂ en concentraciones de 500 µg/m³ por apenas 10 minutos (OMS, 2006). A exposiciones prolongadas por más de 24 horas diversos estudios observan asociación entre los niveles de SO₂ y las tasas de mortalidad diaria a solo 5 µg/m³, lo cual hace suponer un umbral de efecto en la salud por exposición de largo plazo al SO₂ muy bajo (OMS, 2006).

Respecto a los efectos sobre la vegetación, a concentraciones bajas, el SO₂ se puede considerar un nutriente; sin embargo, a dosis altas se convierte en un tóxico con efectos agudos provocando la muerte celular en todo o parte de la planta. A dosis bajas por tiempos prolongados tiene efectos crónicos visibles como clorosis. Una forma de detectar los daños observados por SO₂ es analizar el contenido en azufre de las hojas, donde se acumula (Hernández, 2007).

3.2. Dióxido de nitrógeno, NO₂

De todos los óxidos de nitrógeno (NO_x) solo tres son de relevancia dado que se encuentran en concentraciones apreciables, estos son: NO, NO₂ y N₂O. El NO₂ es un gas de color amarillo-café de olor irritante o picante que puede ser detectado a bajas concentraciones (0,12 ppm ó 22,5 µg/m³). Es



emitido en la combustión de combustibles fósiles. El NO_2 se forma por la oxidación del NO con el O_2 del aire.

El NO_2 y NO son precursores del O_3 . El NO_2 absorbe luz solar reduciéndose a NO y liberando un átomo de oxígeno altamente reactivo, el cual reacciona con el oxígeno molecular presente en la atmósfera para formar O_3 .

El O_3 es un gas muy oxidante que rápidamente se combina con el óxido de nitrógeno para generar NO_2 y cerrar el ciclo.



Sin embargo, en presencia de hidrocarburos este mecanismo de regulación entre el NO , NO_2 y O_3 , se ve alterado.



El NO en vez de degradar el O_3 , reacciona con radicales de peroxiacil, incrementando la presencia de este gas (O_3) en concentraciones peligrosas. El incremento de NO_2 al reaccionar a su vez con radicales de peroxiacil genera peroxiacil nitrato (PANs).



Las reacciones descritas dejan entrever la importancia y participación que les compete a los NO_x , junto a otros compuestos en la generación del smog fotoquímico. Al NO_2 le compete también una participación en el fenómeno de lluvia ácida, debido a la reacción entre el NO_2 y el O_3 , que oxida el NO_2 a NO_3 que en condiciones de humedad genera HNO_3 , el cual es eliminado de la atmósfera en forma de sales de nitrato por precipitación y disuelto en las gotitas de lluvia.

La OMS establece que para exposiciones prologadas todavía no se cuenta con base sólida que permita establecer un valor guía medio anual para el NO_2 mediante cualquier efecto tóxico directo. Además las exposiciones agudas a concentraciones de más de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ han mostrado efectos agudos en la salud principalmente en asmáticos tras la exposición de NO_2 durante una hora, no obstante los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en asmáticos parecen indicar que aumenta con niveles superiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS, 2006).

El impacto de los contaminantes en las plantas a elevadas concentraciones ($>200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) inhibe el desarrollo de la fotosíntesis.

Los efectos observados en la vegetación como consecuencia de la exposición al NO_2 son cambios bioquímicos (actividad enzimática, contenido de clorofila), cambios fisiológicos (asimilación del CO_2 , conductividad de los estomas) y cambios en el crecimiento (producción de biomasa, reproducción y sensibilidad ante estrés climático).



Las condiciones ambientales también influyen la respuesta de las plantas al NO_2 , dado que la solubilidad de muchos gases, incluido el NO_2 es mayor a medida que disminuyen las temperaturas, mientras que la actividad metabólica de la planta y consecuentemente su capacidad de desintoxicarse, es menor. En relación a niveles críticos para la vegetación, la OMS recomienda un valor promedio de 24 horas de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y promedios anuales de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2000).

3.3. Ozono, O_3

El O_3 es un gas presente de forma natural en la estratósfera y que cumple una función importante al actuar como filtro de la radiación UVB. Sin embargo, por su característica altamente oxidante, su presencia a nivel troposférico puede producir daños en la salud y en la vegetación. A nivel de la tropósfera el O_3 es un contaminante secundario, que se genera como se indicó anteriormente.

El O_3 es tóxico para las plantas y diversos cultivos, siendo éstos más sensibles que los humanos. Síntomas agudos se relacionan con concentraciones de O_3 muy elevadas en corto tiempo. Dichos síntomas, observados en plantas con amplio follaje, consisten en clorosis, motas, puntos y necrosis en una cara o en las dos. Los síntomas crónicos se relacionan con concentraciones de O_3 relativamente bajas y frecuentes de forma periódica e intermitente. Dichos síntomas provocan cambios en el crecimiento de la planta, productividad, calidad sin que aparezcan síntomas visibles. Cuando estos síntomas aparecen, se observa clorosis, retraso en la época de crecimiento, senescencia prematura y rotura de las hojas (Delgado, 2004).

En seres humanos la exposición al O_3 se ha asociado con diferentes síntomas. Los más frecuentes son irritación ocular, irritación de las mucosas nasales, tos, dificultad para la respiración profunda, dolor subesternal, opresión en el pecho, astenia, náusea y cefalea. Algunos resultados sugieren que se incrementa el riesgo de desarrollar tempranamente enfermedades respiratorias crónicas, pero no pueden descartarse otros daños debido a que esta molécula es un oxidante y generador de radicales libres muy potente (Flores, 1997).

3.4. Material Particulado

El término material particulado (MP) se refiere a gotas o partículas sólidas o mezclas de ambos, inertes o reactivas en suspensión en la atmósfera de origen natural o antropogénico.

Los riesgos para la salud de las personas por la inhalación del MP presente en el aire, han sido materia de diversos estudios epidemiológicos, que evidencian efectos adversos en la salud de quienes se encuentran expuestos (Voutsas et al., 2002; Fernández et al., 2004). Dichos efectos son amplios, particularmente en los sistemas respiratorios y cardiovascular, tanto a exposiciones leves como prolongadas (OMS, 2006).

El material particulado es altamente diverso y son varios los factores, además de su concentración en masa, que deben ser considerados en la evaluación de su incidencia sobre la salud: características físicas, presencia de sustancias tóxicas, solubilidad en fluidos biológicos, estado de



salud de la población y meteorología de cada localidad impactada. Celis et al (2007) indican que el material particulado en la ciudad de Chillán contiene materia orgánica en un 31% del MP_{10} , material geológico con 27%, nitrato con 11%, el carbono elemental con 8%, amonio con 7%, y sulfato con 5%.

El grado de penetración y retención respiratoria del material particulado es una función directa de su diámetro aerodinámico. Las partículas de diámetros superiores a 45 μm son denominadas material particulado sedimentable (MPS), las partículas inferiores a 45 μm partículas totales en suspensión (PTS). En general, sólo las de diámetro inferior a 10 μm de tamaño (MP_{10}) alcanzan el tracto respiratorio; de ellas, las inferiores a 1 - 2 μm predominantemente se depositan en la región alveolar del pulmón, donde la absorción de algunos elementos traza tóxicos bioacumulables, podría afectar la fisiología tanto del pulmón, como del aparato circulatorio, ya que pueden ingresar al flujo sanguíneo. Las partículas ultra finas (<0,1 μm) tendrían una mayor toxicidad por unidad de masa y tal toxicidad aumentaría conforme disminuye el diámetro aerodinámico de la partícula (Donaldson y MacNee, 1998). Otro factor importante, es la variabilidad espacial y temporal. Las concentraciones de MP_{10} fluctúan de acuerdo a la ubicación espacial, estaciones del año y dirección del viento, siendo las concentraciones más elevadas en invierno que en verano. Entre los principales efectos del material particulado sobre la vegetación se encuentra provocado por la obturación de estomas y reducción de la fotosíntesis y del crecimiento (Dalmasso et al., 1997). No obstante, es conocido el rol de la vegetación como amortiguador sanitario en zonas pobladas. En el suelo, dependiendo del origen del material particulado, se pueden producir incrementos en la concentración de metales y alteraciones en la acidez producto de la depositación de aerosoles secundarios, tales como sulfatos y nitratos.

3.5. Elementos Traza

Dentro de las sustancias químicas presentes en el material particulado, hay algunos elementos traza de origen metálico tóxicos para la población (Harrison y Yin, 2000), siendo bioacumulables y afectando tanto la fisiología del pulmón como el sistema circulatorio. A su vez estos elementos traza¹ originados por fuentes antropogénicas como naturales, al depositarse en la superficie del suelo, pueden ser lixiviados ó absorbidos por las plantas.

Los elementos traza no solo presentan efectos negativos a la salud humana y a las actividades agrícolas. Numerosas investigaciones indican que estos elementos pueden presentar un enriquecimiento anormal en la atmósfera, constituyendo un indicador para la identificación de sus fuentes; una alta correlación de las concentraciones de diversos elementos traza entre si, es indicador de que son emitidos por una misma fuente (Fang et al., 2006).

¹ El concepto de elemento traza incluye elementos metálicos como no metálicos, entre estos se encuentra As y Mo.



3.5.1. Arsénico (As)

El As es un elemento traza no esencial para humanos, animales y plantas. Es tóxico y puede estar presente en forma orgánica e inorgánica. La forma inorgánica denominada As (III) ó As_2O_3 (trióxido de arsénico) es la más tóxica. El As se puede encontrar en concentraciones que van de 1 ng/m^3 en zonas rurales a 30 ng/m^3 en áreas urbanas. En las cercanías de fundiciones de metales y centrales termoeléctricas que usan combustibles con alto contenido de As las concentraciones pueden superar 1 $\mu g/m^3$. El cáncer al pulmón producto de su inhalación es uno de los efectos más críticos para la población (WHO, 2000); la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer) lo clasifica en el grupo 1 es decir, cancerígeno humano comprobado. A su vez para los vegetales es fitotóxico y en altas concentraciones puede llegar a inhibir el crecimiento de la planta y causar su muerte. El As se encuentra en el suelo en formas móviles con pH entre 7 y 9, acumulándose en su forma inorgánica principalmente en las raíces de la planta (SAG, 2005).

3.5.2. Cadmio (Cd)

El Cd es un elemento traza no esencial para humanos, animales y plantas. Entre sus fuentes antropogénicas se asocian las emisiones de industrias del cemento (García et al, 2002) y los fertilizantes fosfatados (SAG, 2005). El Cd y sus compuestos esta clasificado por la IARC en el Grupo 1 pues puede producir cáncer al pulmón en humanos y animales expuesto por inhalación. La OMS indica un valor de referencia para su concentración en el aire de 5 ng/m^3 (WHO, 2000). En las plantas provoca atrofia en el crecimiento y clorosis. Inhibe la absorción de Fe en las plantas e interfiere en la absorción y transporte de otros elementos esenciales para las plantas tales como Ca, Mg, P, K y además en la absorción de agua (SAG, 2005).

3.5.3. Cobre (Cu)

El Cu es un elemento esencial para humanos, animales y plantas. Es tóxico pero no venenoso para el hombre. La OMS no lo contempla como contaminante por exposición aérea ni establece valores límite de referencia para su concentración en el aire. Su presencia en el material particulado se asocia a emisiones procedentes de fundiciones de Cu.

3.5.4. Manganeso (Mn)

El manganeso es un elemento común en la corteza terrestre. En zonas cercanas a fundiciones metálicas puede alcanzar concentraciones en el aire de 0,5 $\mu g/m^3$. Su inhalación en bajas concentraciones en ambientes laborales se asocia a trastornos psiquiátricos y del movimiento, por lo que se considera neurotóxico. También se asocia a problemas respiratorios y reproductivos. Por su efecto neurotóxico la OMS establece un valor de concentración límite para exposición por inhalación de 0,15 $\mu g/m^3$. No es considerado por la IARC como un elemento cancerígeno (WHO, 2000). Es esencial para las plantas, sin embargo cuando se encuentra disponible en altas concentraciones en el suelo



puede ser traslocado en forma pasiva a las raíces en forma de catión libre y de allí a los tejidos de la planta, principalmente al tejido meristemático responsable del crecimiento de la planta (SAG, 2005).

3.5.5. Mercurio (Hg)

El Hg es un elemento traza emitido preferentemente por la quema de carbón en centrales termoeléctricas e incineración de residuos peligrosos, mayoritariamente en forma inorgánica sea como Hg^0 ó como ión (Hg_2^{++} ; Hg^{++}). Mientras la mayor parte de las emisiones iónicas de Hg se depositan localmente, las emisiones de Hg^0 son transportadas por largas distancias, pasando a formar parte del depósito atmosférico global de Hg. En zonas urbanas las concentraciones de Hg pueden alcanzar valores de 10 ng/m^3 . La OMS establece un valor de referencia para la concentración de Hg inorgánico en el aire de $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

La depositación del Hg inorgánico es motivo de preocupación dado que la transformación a su forma orgánica ó metilada es la más tóxica y su presencia en peces y semillas contaminadas ha producido serios envenenamientos en humanos (SAG, 2005).

3.5.6. Molibdeno (Mo)

El Mo es un elemento traza esencial y no tóxico para animales, el hombre y las plantas. Por el contrario, en estas últimas la carencia de Mo, produce malformación en las hojas, necrosis y clorosis (SAG, 2005). Su presencia en el aire se asocia a la presencia de fundiciones de cobre.

3.5.7. Plomo (Pb)

El Pb es un elemento no esencial. Es considerado neurotóxico en humanos. En zonas rurales su presencia en el aire se encuentra en concentraciones del orden de $0,15 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ y en sitios urbanos entre $0,15$ y $0,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Los niveles normales de Pb en la sangre son de 10 a $30 \text{ } \mu\text{g/l}$, siendo de $100 \text{ } \mu\text{g/l}$ el valor guía propuesto por la OMS. La OMS tomando en consideración que la exposición al Pb en el aire se puede producir por vía directa o indirecta, asume que $1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ de Pb podría contribuir a la presencia de $50 \text{ } \mu\text{g/l}$ de Pb en la sangre. La OMS propone un valor guía para la concentración de Pb en el aire de $0,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (WHO, 2000). En las plantas suele acumularse en las raíces (SAG, 2005).

3.5.8. Níquel (Ni)

Es un elemento esencial para humanos, animales y plantas. No obstante los compuestos de Ni son considerados cancerígenos por inhalación en humanos (WHO, 2000) siendo clasificados en el grupo 1 por la IARC. La OMS establece valores de referencia para su concentración en el aire de 250 ng/m^3 , para niveles de riesgo de sobrevida de 1:10.000.



3.5.9. Vanadio (V)

Su presencia en el aire puede causar efectos crónicos en el sistema respiratorio, tales como irritación de las vías respiratorias. La evidencia indica que en los países industrializados el V no se encuentra en concentraciones susceptibles de causar potenciales efectos dañinos, no obstante la OMS recomienda un nivel de concentración límite en el aire de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En áreas urbanas las concentraciones en el aire se encuentran entre 50 y $200 \text{ ng}/\text{m}^3$, sin embargo en invierno producto de la combustión de combustibles que contienen V las concentraciones pueden subir hasta en $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (WHO, 2000).

3.5.10. Cromo (Cr)

El cromo trivalente o Cr (III) es un elemento traza esencial para humanos y animales. Sin embargo el cromo hexavalente o Cr (VI) es tóxico y cancerígeno clasificado por la IARC dentro del grupo 1. La OMS recomienda valores de referencia para concentración de Cr (VI) en $2,5 \text{ ng}/\text{m}^3$, para un nivel de riesgo de sobrevida de 1:10.000 (WHO, 2000). Para las plantas el Cr (VI) es fitotóxico y se manifiesta en una reducción del crecimiento y desarrollo de las raíces (SAG, 2005).

3.5.11. Antimonio (Sb)

El antimonio es un metal de color blanco plateado que se encuentra en la corteza terrestre, que puede ser liberado al medio ambiente desde fuentes naturales e industriales. Se puede encontrar antimonio en el aire cerca de industrias que lo procesan o lo liberan, tales como fundiciones, plantas donde se quema carbón, y donde se incinera basura. Ni la IARC, ni la EPA han clasificado al antimonio en cuanto a carcinogenicidad en seres humanos. La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA) ha establecido un límite máximo en el trabajo de $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ durante una jornada de 8 horas diarias, 40 horas semanales (ATSDR, 1995).

3.5.12. Talio (Tl)

El talio en forma pura es un metal blanco azulino que se encuentra en muy pequeñas cantidades en la corteza terrestre. La exposición a altos niveles de talio puede producir efectos perjudiciales para la salud. En un estudio de trabajadores expuestos durante varios años a través de inhalación en el trabajo se observaron efectos sobre el sistema nervioso como adormecimiento de los dedos de las manos y los pies. No hay estudios disponibles en seres humanos o en animales acerca de los efectos carcinogénicos de respirar, ingerir o tocar talio. El Instituto Nacional de Seguridad Ocupacional y Salud de los Estados Unidos (NIOSH) recomienda que un nivel de talio de $15 \text{ mg}/\text{m}^3$ sea considerado como inmediatamente peligroso a la vida y la salud. Este es el nivel de exposición a una sustancia química que es probable que cause daño permanente a la salud o la muerte (ATSDR, 1995).



3.5.13. Cinc (Zn)

El cinc es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. El cinc es un elemento esencial en la dieta. Ingerir muy poco cinc puede causar problemas, pero demasiado cinc también es perjudicial. Cierta cantidad de cinc es liberada al ambiente por procesos naturales, pero la mayor parte proviene de actividades humanas tales como la minería, producción de acero, combustión de petróleo e incineración de basura. Inhalar grandes cantidades de polvos o vapores de cinc puede producir una enfermedad de corta duración llamada fiebre de vapores de metal. No se sabe cuáles son los efectos a largo plazo de respirar altos niveles de cinc. La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) no ha clasificado al cinc en cuanto a carcinogenicidad. Para proteger a los trabajadores, La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU. (OSHA) ha establecido un límite de 1 miligramo por metro cúbico de aire (1 mg/m^3) para vapores de cloruro de cinc y de 5 mg/m^3 para óxido de cinc (polvos o vapores) en el aire del trabajo durante jornadas de 8 horas diarias, 40 horas a la semana (ATSDR, 2005).

3.6. Normas y recomendaciones sobre calidad del aire

Las normas primarias de calidad del aire en Chile, establecen el nivel de riesgo socialmente aceptado. Son también el objetivo o meta de la gestión ambiental, y frente a su incumplimiento se establecen planes de prevención de la contaminación o planes de descontaminación (Matus y Lucero, 2002). La primera definición normativa fue establecida por el Ministerio de Salud, mediante la Resolución 1.215 del año 1978. En ella se fijaron las normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica, definiéndose las normas de calidad del aire para los contaminantes: PTS, CO, SO₂, NO₂ y oxidantes fotoquímicos O₃ (Matus y Lucero, 2002). En 1998 con la promulgación del DS 59/1998 se estableció la norma de calidad del aire para MP₁₀. En 2002 tras un proceso de revisión se promulgan las nuevas normas de calidad del aire para CO, SO₂, NO₂ y O₃. A su vez se dejó sin efecto la norma para PTS.

En relación a las normas de calidad secundaria, en Chile desde 1991 estuvo vigente la norma secundaria para SO₂ contenida en el DS 185/1991, la cual culminado su proceso de revisión dio paso a la nueva norma secundaria para SO₂ contenida en el DS 22/2010.

Los cuadros 1 al 4 presentan las concentraciones límites en el aire, normadas en Chile y recomendadas por la OMS para los contaminantes SO₂, NO₂, O₃, MP₁₀ y MP_{2,5}, respectivamente. Para los elementos traza, se agregan las normas de calidad de la CEE (Cuadro 5)



Cuadro 1. Normas de calidad para SO₂ en Chile y límites recomendados por la OMS

Calidad del Aire SO ₂	SO ₂ (µg/ m ³)	Criterio	Método
DS 113/2002 Norma Primaria		80 250	Media anual Media 24 h (p 99)
	Niveles de emergencia	1: 1.962 - 2.615 2: 2.616 - 3.923 3: sobre 3.924	Media 1 hora
Estándar Primario OMS (recomendación)	Objetivo intermedio 1	120	Media 24 h
	Objetivo intermedio 2	50	Media 24 h
	Estándar Recomendado	20 500	Media 24 h Media de 10 min.
DS 185/1991 Norma Secundaria (sustituida por DS 22/2010)	Zona Norte	80 365 1000	Media anual Media 24 h Máx. 1 h
	Zona Sur	60 260 700	Media anual Media 24 h Media 1 h
DS 22/2010 Norma Secundaria	Zona Norte	80 365 1000	Media anual Media 24 h (p99,7) Media 1 h (p99,73)
	Zona Sur	60 260 700	Media anual Media 24 h (p99,7) Media 1 h (p99,73)
	Niveles de emergencia	1: 1.962 - 2.615 2: 2.616 - 3.923 3: sobre 3.924	Media 1 hora
Estándar Secundario OMS (recomendación)	Cultivos	30	Media anual ó semestral (invierno)
	Forestal y vegetación nativa	20	Media anual

Cuadro 2. Norma de calidad para de NO₂ en Chile y límites recomendados por la OMS

Calidad del Aire NO ₂	NO ₂ (µg/ m ³)	Criterio	Método
DS 114/2002 Norma Primaria		100 400	Media anual Media 1 hora (p 99 máx. diarios)
	Niveles de emergencia	1: 1130 - 2259 2: 2260 - 2999 3: sobre 3000	Media 1 hora
Estándar Primario OMS (recomendación)	40 200	media anual media de 1 hora	No Especifica
Estándar Secundario OMS (recomendación)	30 75	Media anual Media 24 h	No Especifica



Cuadro 3. Norma de calidad para de O₃ en Chile y límites recomendados por la OMS

Calidad del Aire O ₃	O ₃ (µg/ m ³)		Criterio	Método	
DS 112/2002 Norma Primaria		120	Media de 8 h (p 99 de máx. 24 h)	<ul style="list-style-type: none"> - Quimioluminiscencia con etileno - Fotometría de absorción UV - cromatografía líquida gas/sólido - Espectrometría de absorción óptica diferencial con calibración in situ - otro equivalente recomendado por la USEPA ó CEE 	
	Niveles de emergencia	1: 400 - 799 2: 800 - 999 3: sobre 1000	Media 1 hora		
Estándar Primario OMS (recomendación)	Nivel alto	240	Media de 8 h	No especifica	
	Objetivo intermedio 1	160	Media de 8 h		
	Estándar Recomendado	100	Media de 8 h		
Estándar Secundario OMS (recomendación)	AOT40*	ppm-h	mg/ m ³ -h	No especifica	
	Cultivos	3	6		3 meses
	Cultivos (daño visible)	0,2 0,5	0,4 1		5 días (Aire húmedo) 5 días (Aire seco)
	Forestal	10	20		6 meses
	Vegetación nativa – semi nativa	3	6		3 meses

* Corresponde a la suma de las concentraciones de 1 hora donde se supera el umbral de 40 ppb (80 µg/ m³).



Cuadro 4. Normas de calidad para MP₁₀ y MP_{2,5} en Chile y límites recomendados por la OMS

Calidad del Aire MP ₁₀	MP ₁₀ (µg/ m ³)	MP _{2,5} (µg/ m ³)				Criterio	Método
DS 59/1998 Norma Primaria MP10	50 150	No Aplica				Media anual Media 24 h (p 98)	-Gravimétrico de muestreador de alto y bajo volumen; -Transducción gravimétrica de oscilación inducida; -Principio de atenuación beta.
	Niveles de emergencia 1: 195-239 2: 240-329 3: >330	No Aplica				Media 1 hora	
Resolución 4624/2009 Aprueba anteproyecto de norma primaria de calidad ambiental para MP _{2,5} *	No Aplica	2012 25 63	2022 20 50	2032 10 25	Media anual Media 24 h (p 99)	Métodos de referencia ó equivalente recomendado por la USEPA ó alguno de los estados de la CEE que implementen directrices del Comité de Estandarización ó certificación del país de origen.	
	Niveles de emergencia 1 2 3	97-131 132 – 199 >200	88 – 124 125 -199 >200	69 – 112 113 – 199 >200	Media 1 hora		
Estándar Primario OMS (recomendación)	Objetivo intermedio 1 70 150	35 75				Media anual Media 24 h (p 99)	No Especifica
	Objetivo intermedio 2 50 100	25 50				Media anual Media 24 h (p 99)	
	Objetivo intermedio 3 30 75	15 37,5				Media anual Media 24 h (p 99)	
	Estándar Recomendado 20 50	10 25				Media anual Media 24 h (p 99)	
DS 4/1992 Norma Secundaria MPS en la cuenca del Río Huasco III Región	mg/(m ² día)	Meses en que aplica			Criterio	Método	
	MPS 150	Todos			Media mensual	Medición de partículas en caída gravitacional en una determinada superficie de intercepción por una unidad de tiempo.	
	MPS 100	Todos			Media anual		
	Fe _{MPS} 60	Todos			Media mensual	Métodos aprobados por el SAG	
	Fe _{MPS} 30	Septiembre – Octubre – Noviembre – Primera semana de Diciembre			Media mensual		
	Fe _{MPS} 30	Todos			Media anual		

* El 01.01.2012 entra en vigencia el DS 12/2011 Norma primaria para MP_{2,5} que establece como límites una concentración anual de 20 µg/m³, y una concentración diaria de 50 µg/m³.



Cuadro 5. Normas de calidad para elementos traza en Chile, la CEE y límites recomendados por la OMS.

Calidad del Aire		(ng/ m ³)	Criterio		Método
DS 136/2000 Norma Primaria para plomo (Pb)	Pb	500	Media anual		- Espectrometría de absorción atómica ISO 9855 Aire ambiente Determinación del contenido particulado de plomo en aerosoles captados en filtros
Estándar Primario OMS (recomendación) WHO, 2000	As (Según nivel de riesgo)	66 6,6 0,6	1:10.000 1:100.000 1:1.000.000	Media anual	No especifica
	Ni (Según nivel de riesgo)	250 25 2,5	1:10.000 1:100.000 1:1.000.000	Media anual	
	Cr (VI) (Según nivel de riesgo)	2,5 0,25 0,025	1:10.000 1:100.000 1:1.000.000	Media anual	
	Cd	5	Media anual		
	Hg	1000			
	Mn	150			
	Pb	500			
V	1000				
Directiva 1999/30/CE	Pb	500	Media anual		- Espectrometría de absorción atómica ISO 9855 Aire ambiente Determinación del contenido particulado de plomo en aerosoles captados en filtros - Cualquier otro método con resultados equivalentes al método anterior.
Directiva 2004/107/EC	As	6	Media anual		- Muestreo MP ₁₀ EN 12341 - Espectrometría de absorción atómica ó espectrometría de masa ICP - Los estados miembros podrán usar métodos normalizados nacionales o ISO
	Cd	5			
	Ni	20			

3.7. Gestión de la calidad del aire en Chile

La vigilancia de la calidad del aire es responsabilidad de la Autoridad Sanitaria de cada región (ASR). Le corresponde administrar y monitorear la calidad del aire registrada en las estaciones de monitoreo públicas, red MACAM y CIVICA; a su vez, le compete la fiscalización de las redes y/o estaciones de monitoreo privadas. Paralelamente, la vigilancia de la calidad secundaria del aire es competencia del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). En general, en Chile las estaciones de monitoreo están asociadas a planes de descontaminación o a la ejecución de proyectos de inversión evaluados en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Con el fin de gestionar la información sobre calidad del aire, se ha implementado un Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA), que es coordinado por el Ministerio del Medio Ambiente (ex CONAMA), en conjunto con los organismos competentes en la materia (ASR y SAG). Respecto a las emisiones atmosféricas, estas se encuentran reguladas por las normas de emisión. Además dentro de los alcances del Registro de Emisión y Transferencia de Contaminantes (RETC),



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza
Programa Inter facultades, Magister en Gestión y Planificación Ambiental

coordinado por el Ministerio del Medio Ambiente² y fiscalizado por la ASR, le corresponde a las empresas informar cada año a la autoridad acerca de sus emisiones a través de la Declaración de Emisiones en cumplimiento del DS 138/2005 del MINSAL.

² Actualmente Ministerio del Medio Ambiente tras la dictación de la Ley 20.417.



4. MATERIALES Y MÉTODO

Se trabajó con información validada procedente de CONAMA Región de Valparaíso³, correspondiente a datos de calidad del aire y meteorología obtenidos desde las redes de estaciones de monitoreo privadas, localizadas en el área de estudio, las cuales fueron informadas por las empresas propietarias de las estaciones, basadas en la validación que efectúan las empresas administradoras de las estaciones.

4.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en la Región de Valparaíso. Abarca territorialmente las comunas de Concón, Quillota, La Cruz, La Calera, Nogales, Hijuelas, Limache, Llay Llay, Catemu y Panquehue. Todas estas comunas, salvo Nogales, presentan estaciones de monitoreo para la medición permanente de la calidad del aire. En la comuna de Nogales se han realizado mediciones puntuales de calidad del aire en el marco de procesos de evaluación ambiental de proyectos. La Figura 1 muestra el emplazamiento del área de estudio y las estaciones de monitoreo meteorológico y de la calidad del aire.

En el área de estudio se conjugan actividades agrícolas e industriales; se localiza en la sección baja e intermedia de la cuenca del río Aconcagua rodeada por el relieve de la cordillera de la costa que incide en el transporte, a través de la cuenca, de los contaminantes presentes en los flujos de aire SW, conduciéndolos durante el día desde Concón en la costa hacia las secciones más altas como Catemu y Panquehue, mientras que durante la noche se invierte. A ello se suma el efecto que tienen las bajas temperaturas y las bajas velocidades promedio del viento en otoño e invierno que facilitan la acumulación de contaminantes debido a la disminución de la altura de la capa de mezcla producto de la baja radiación solar, que hace previsible la acumulación de contaminantes en valles y cuencas encerradas, además de la recirculación de contaminantes debido a las direcciones de viento alternantes entre día y noche (CENMA, 2001). Dentro del área de estudio, la zona circundante a la fundición Chagres es la única que se encuentra declarada Zona Latente para SO₂, mediante el DS 185/91 del Ministerio de Minería. Hasta la fecha no existen nuevas solicitudes formales para la declaración de zona latente ni saturada en el área de estudio.

³ Actualmente Seremi de Medio Ambiente Región de Valparaíso tras la dictación de la Ley 20.417.

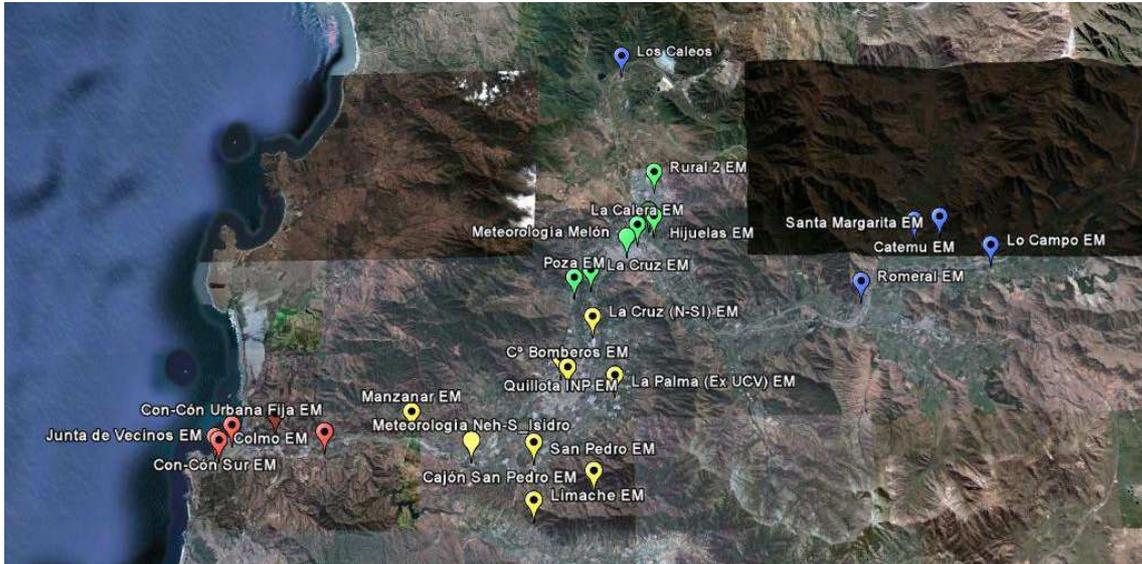


Figura 1. Localización de las estaciones de monitoreo en la zona de estudio, que según los colores, muestran en color rojo las estaciones de la red Enap; en amarillo estaciones de la red Nehuenco – San Isidro; en verde las estaciones de la red melón; en azul las estaciones de la red Chagres.

4.2. Análisis de la meteorología de superficie

Se revisaron los informes mensuales de meteorología de superficie medidos en las estaciones localizadas en el área de estudio para radiación solar, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y precipitación. Se evaluó el comportamiento de estos parámetros meteorológicos de superficie con la finalidad de observar sus patrones diarios, mensuales y anuales. No se dispuso de información de meteorología de altura.

4.3. Informes de monitoreo de calidad de aire

Se revisaron los informes mensuales de monitoreo que incluyen planillas de datos para NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} , $\text{MP}_{2,5}$, HCT, HCNM y elementos traza, que las empresas propietarias de las redes de monitoreo de calidad del aire entregan a las autoridades. Las condiciones de operación de las estaciones se encuentran reguladas por resoluciones ambientales (RCAs) y sectoriales que las clasifican como estaciones con representatividad poblacional para partículas (EMRP) y/o gases (EMRPG).

Los equipos de medición de calidad del aire miden datos crudos que son almacenados digitalmente, posteriormente rescatados de forma directa y/o transmitidos en línea a las centrales de las respectivas empresas operadoras de las estaciones y/o a propietarias de las redes, para su



validación y posterior envío a las autoridades competentes (ASR, SAG, CONAMA⁴). Para el caso de equipos de muestreo MP₁₀ (HI-VOL) y/o MP_{2,5} (Dicótomos), los filtros con muestras, tras ser colectados, son “masados” (método gravimétrico) y analizados en su composición química si es requerido.

4.3.1. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire

Se efectuó una inspección visual a los exteriores de las estaciones monitoras en estudio. Con el fin de evaluar aspectos técnicos de su emplazamiento, se aplicó una lista de chequeo basada en los requisitos normados para medición de partículas y gases. Las visitas se efectuaron los días 10 de enero de 2009 y 17 de abril de 2010. Se revisaron a su vez las actas de fiscalización del Comité Operativo de Fiscalización de la COREMA Región de Valparaíso (COF) a las estaciones de monitoreo, información disponible en la dirección www.seja.cl.

En el Anexo 2 se exponen antecedentes de las estaciones monitoras presentes en el área de estudio⁵. No fueron considerados los datos de monitoreo de la estación Los Vientos sector Las Vegas comuna de Llay Llay operativa a partir de enero de 2007.

4.3.2. Métodos de medición de contaminantes

La información relativa a los métodos de medición se obtuvo del Sistema Nacional de Calidad del Aire disponible en el sitio página en Internet www.sinca.cl. Los métodos de medición de MP₁₀ utilizados en las estaciones de monitoreo corresponden principalmente al método gravimétrico de muestras colectadas con equipo MP₁₀ de alto volumen (HI-VOL de 700 l/min). En la estación Concón- Santa Margarita de ENAP además se realiza muestreo con equipo MP_{2,5} RAAS con flujo de 16,67 l/min. A partir de 2005, en las estaciones Cuerpo de Bomberos, San Pedro y La Palma (Ex UCV) se comienza un monitoreo continuo basado en principio de atenuación beta. Estos métodos se encuentran normados en el artículo 7 del DS 59/2008. El método de medición de SO₂ empleado en las estaciones de monitoreo corresponden al método de fluorescencia ultravioleta, (Art 8 del DS 113/2002). El método empleado para la medición de NO₂ y NO corresponde a quimioluminiscencia en fase gaseosa (Art. 8 del DS 114/2002). Para la medición de O₃, se utiliza método de fotometría de absorción ultravioleta (Art. 6 del DS 112/2002). El detalle de los métodos de medición utilizados por estación monitorea se puede consultar en el Anexo 2.

⁴ La nueva institucionalidad establece que dicha función recaerá en la Superintendencia de Fiscalización Ambiental.

⁵ Hijuelas midió entre junio de 1999 y marzo de 2002; Rural 2 entre abril y diciembre de 2003; Poza Cristalina entre abril 2001 y mayo 2002; Quillota –INP y Cajón de San Pedro midieron entre octubre de 1998 y diciembre de 1999; Limache entre agosto 1999 y octubre de 2000; Concón Sur fue sustituida por Junta de Vecinos en marzo de 2006; La Cruz y Manzanar no fueron considerada dado que su respaldo legal es de 2008, similar situación con la estación Los Vientos.



4.3.3. Registros de calidad del aire

Los datos validados de calidad del aire comprenden registros de SO₂, NO₂/NO, O₃, MP₁₀, MP_{2,5} e HCT/HCNM entre los años 1998 a 2008, proporcionados por CONAMA Región de Valparaíso en formato Planilla de Cálculo. En Anexo 3, se entrega para cada estación monitorea un detalle de los períodos de medición evaluados. Los datos se agruparon en planillas de cálculo estructuradas en tablas dinámicas (MS Excel) y se evaluaron las concentraciones respecto a sus respectivas normas primarias de calidad del aire. En el Cuadro 6, se puede apreciar el registro consolidado de la información procesada para los contaminantes: NO₂, O₃, SO₂, MP₁₀, MP_{2,5} y HCT. Adicionalmente, se consideraron los valores de concentración informados por la Seremi de Salud de Valparaíso. Como criterio general para la validación normativa de los registros validados técnicamente, se contaron los registros promedio horarios medidos, descartándose los registros horarios inválidos ó perdidos (según tabla 2 del DS 61/2008). El promedio diario se calculó con un mínimo de 18 promedios horarios válidos (Art. 2 letra n). La validación de los promedios anuales de las estaciones se efectuó con un mínimo de 75% de promedios diarios válidamente medidos.

Cuadro 6. Registros diarios y horarios de calidad del aire evaluados en la zona de estudio

Contaminantes	Nº de días	Nº de datos (horarios)	Norma
NO ₂	20.748	497.952	DS 114 2002
O ₃	20.108	482.592	DS 112 2002
SO ₂	35.672	856.128	DS 113 2002
MP ₁₀	12.760	-	DS 59 1998
MP _{2,5}	770	-	No aplica
HCT	25.145	603.480	No aplica

4.4. Evaluación de los contaminantes NO₂, O₃, SO₂, MP₁₀, MP_{2,5}

Se trazaron curvas de comportamiento de las concentraciones de los contaminantes estudiados, con el fin de esclarecer el comportamiento espacial y temporal de cada contaminante, además de sus interacciones. Se realizó una evaluación de los niveles de calidad del aire, comparando las concentraciones atmosféricas de cada uno, en relación a los valores límites normados o recomendados.

Se aplicó el método de análisis de componentes principales con rotación Varimax, a los registros horarios de HCT, HCNM, NO₂, NO, O₃, velocidad y dirección del viento, temperatura y radiación solar, medidos durante el año 2007 en la estación monitorea Concón Urbana Fija (Santa Margarita), para identificar de manera preliminar, posibles factores o fuentes que inciden en las reacciones fotoquímicas que generan O₃.



4.5. Emisiones atmosféricas

Con el fin de esclarecer la magnitud de las emisiones para cada una de las fuentes atmosféricas presentes en la zona de estudio, se efectuó una revisión de las emisiones declaradas correspondientes al año 2006, en el marco de la declaración anual de emisiones que las empresas efectuaron el año 2007, exigida por DS 138/2005 del Ministerio de Salud.

4.6. Evaluación de los análisis químicos de filtros MP₁₀

De acuerdo a información suministrada por CONAMA Región de Valparaíso, la caracterización de filtros de MP₁₀ de las estaciones Catemu y Lo Campo, fue realizada por SGS Chile Ltda.; la de estaciones Concón- Santa Margarita, Concón Sur y Colmo fue realizada por CIMM T&S; la de las estaciones Hijuelas, La Calera y Rural 1 fue realizada por el DICTUC. Las técnicas aplicadas se dan en el Anexo 2.

Se calculó la concentración promedio anual de los elementos traza, a objeto de obtener una serie de tiempo anual que permita observar tendencias. Los promedios se obtuvieron de las concentraciones sobre el límite de detección. En el Cuadro 7 se observa la representatividad de los promedios de las concentraciones de elementos traza en el MP₁₀, dado por el porcentaje de mediciones sobre el límite de detección (SLD).

Cuadro 7. Representatividad de las mediciones de elementos traza en el MP₁₀, según porcentaje de mediciones superiores al límite de detección respectivo.

Estación	As	Cd	Cu	Mn	Hg	Mo	Pb	Zn	Sb	Tl	Ni	V	Cr
Catemu	100	85	100	100	77	85	100	100	SD	SD	SD	SD	SD
Lo Campo	100	92	100	100	77	92	100	100	SD	SD	SD	SD	SD
Colmo	97	3	100	SD	SD	SD	67	SD	SD	SD	24	0	SD
Concón- Santa Margarita	98	7	100	SD	SD	SD	72	SD	SD	SD	34	0	SD
Concón Sur	96	2	100	SD	SD	SD	67	SD	SD	SD	23	0	SD
Hijuelas	100	21	SD	SD	4	SD	92	100	5	17	SD	SD	32
La Calera	95	12	SD	SD	4	SD	90	97	31	10	81	55	43
Rural 1	89	5	SD	SD	4	SD	85	91	44	2	74	53	46

SD: Sin dato

Para la determinación de origen se calcularon los factores de enriquecimiento para los elementos traza, medidos en cada estación monitora. Con el fin de calcular el factor de enriquecimiento, se consideró que cada estación monitora tuviera a lo menos un 67% de las concentraciones sobre el límite de detección. Para el cálculo de Hg se utilizaron las mediciones de las estaciones Catemu y Lo Campo, donde el 77% de las concentraciones eran iguales al límite de detección, sin embargo por esta precisa circunstancia no fueron considerados en el cálculo del factor de enriquecimiento.



Se utilizó la fórmula aplicada en Préndez y Carrasco (1991) con la concentración promedio para elementos traza en la corteza terrestre según Mason (1966) y Rudnick y Gao (2003), y las concentraciones en los suelos de la zona de estudio, obtenidos de Gidhagen et al. (2000); Universidad Mayor (2005); SERPRAM (2004). Las figuras 2 y 3 indican los puntos de muestreo de suelos. La ecuación 7 muestra la fórmula utilizada.

$$FE = \left(\frac{[X_{MP10}]}{[Al_{MP10}]} \right) / \left(\frac{[X_{suelo(o_corteza)}]}{[Al_{suelo(o_corteza)}]} \right) \quad (7)$$

Donde $[X_{MP10}]$ expresa la concentración de un elemento traza en el MP en ng/m^3 , $[X_{suelo(o_corteza)}]$ expresa la concentración de un elemento traza en mg/kg en el suelo ó corteza terrestre. El criterio utilizado consideró $FE \leq 10$ para para el origen natural del elemento; valores superiores a 10 indican origen en antrópico.

Cuadro 8. Composición promedio de elementos traza en la corteza terrestre y en los suelos de la zona de estudio

Elemento	Corteza	Suelo		
		Catemu/ Lo Campo	Colmo	La Calera/ Rural 1/ Hijuelas
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Al	81.300	63692	63692	63692
As	1,8	14,5	10,7	28,8
Cd	0,09	2,0	0,7	1,1
Cu	55	70,2	73,7	68,7
Mn	950	1109,7	957,6	940,0
Mo	1,5	2,6	-	0,6
Pb	17 ⁸	35,8	24,0	21,6
Zn	70	69,4	101,8	154,0
Ni	75	-	12,4	20,7

Por su parte, dado que no se dispone de muestras de suelo de Concón, las estaciones monitoras de dicha zona no son consideradas para efectos de cálculo de FE respecto a suelo.



contaminante o fuente, la presencia de receptores, y la vía de exposición. Para ello se diseñó una matriz multi-criterio con el fin de sintetizar la información procesada. Dicha matriz consideró los siguientes factores:

- Meteorología
- Calidad del aire y sus tendencias
- Magnitudes de las emisiones
- Distancia de los receptores a fuentes más cercanas
- Población expuesta / vegetación expuesta
- Certidumbre de los datos

Cada uno de los factores indicados se jerarquizó de acuerdo a los criterios de valoración indicados en los cuadros 9 y 10. Posteriormente se obtuvo un índice de riesgo para la salud y para la vegetación a partir de las siguientes ecuaciones 8 y 9:

$$IR_{SP} = ME \cdot 1F \cdot 2F \cdot PE \cdot ECA \cdot MET \cdot TCA \cdot CD \quad (8)$$

$$IR_V = ME \cdot 1F \cdot 2F \cdot VE \cdot ECA \cdot MET \cdot TCA \cdot CD \quad (9)$$

Donde,

IR_{SP}: Índice de Riesgo para la salud de la población

IR_V: Índice de Riesgo para la vegetación

ME: Magnitud de emisiones por comuna

1F: Fuente más cercana

2F: Segunda fuente más cercana

PE: Población Expuesta

VE: Vegetación Expuesta

ECA: Estado de la Calidad del Aire

MET: Meteorología

TCA: Tendencia de la Calidad del Aire

CD: Certidumbre de los Datos.

Para ponderar la población expuesta se ocupó información del CENSO 2002, disponible en la página web del INE (www.ine.cl). Para la ponderación de la vegetación expuesta se efectuó interpretación de fotografías aéreas disponibles en www.sinia.cl y software Google Earth. Si bien la ponderación se efectuó a base de una caracterización territorial del uso de suelo, posteriormente con información del Censo agropecuario y forestal 2007 se obtiene una caracterización del tipo de cultivo expuesto en cada comuna. Esta información se obtuvo de la página web www.censoagropecuario.cl.



Cuadro 9. Matriz multicriterio aplicada a enfoque de riesgo a la salud de la población

Factores de Riesgo a la salud de la población	Criterios de valoración			
	4	3	2	1
Magnitud de emisiones por comuna: ¿Cuál es la magnitud que tienen las emisiones totales en la comuna donde se localiza la estación de monitoreo?	Alta	Media	Baja	Muy baja
	t/año	t/año	t/año	t/año
SO ₂	>10000	<=10000 y >2000	<=2000	Sin Emisiones
NO _x	>1000	<=1000 y >200	<=200	Sin Emisiones
PTS	>500	<=500 y >100	<=100	Sin Emisiones
COV	>100	<=100 y >10	<=10	Sin Emisiones
Fuente más cercana: ¿Cuán distante se encuentra la fuente más cercana?	Cerca	Intermedia	Lejos	Muy lejos
	km	km	km	km
	<=4	>4 y <=12	>12 y <=40	>40
Segunda fuente más cercana: ¿Cuán distante se encuentra la segunda fuente más cercana?	Cerca	Intermedia	Lejos	Muy lejos
	km	km	km	km
	<=4	>4 y <=12	>12 y <=40	>40
Población Expuesta: N° habitantes donde se localiza la estación de monitoreo	Ciudad ó Centro Urbano	Pueblo	Aldea ó Caserío	Sin Población
	Hab.	Hab.	Hab.	Hab.
	> 10000	<=10000 y >1000	<=1000	Sin Población
Estado Calidad del Aire: ¿Cuál es el estado de la calidad del aire?	Saturada	Latente	Regular	Buena
	Igual o superior a norma primaria	Inferior a norma primaria, pero superior a 80% de norma primaria	Inferior a 80% de norma primaria, pero superior a valor recomendado OMS	Inferior a valor recomendado OMS
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
SO ₂	DS 113: >=80 anual; >=250 diaria	DS 113: <80 anual; <250 diaria	DS 113: <72 anual; <200 diaria	OMS: <120 diario (OI 1); 500 10 min.
NO ₂	DS 114: >=100 anual; >=400 horario	DS 114: <100 anual; <400 horario	DS 114: <80 anual; <320 horario	OMS: <40 anual; 200 horario
O ₃	DS 112 : >=120 (8 horas)	DS 112 : <120 (8 horas)	DS 112 : >=96 (8 horas)	DS 112 : <60 (8 horas)*
MP ₁₀	DS 59: >=50 anual; >=150 diaria	DS 59: <50 anual; <150 diaria	DS 59: <40 anual; <120 diaria	OMS: <30 anual (OI 3); <75 diaria (OI 3)
Meteorología: ¿Cuál es su incidencia en la dispersión y/o transporte de los contaminantes?	Desfavorable	Neutra	Favorable	Muy Favorable
Tendencia de la calidad del aire: ¿Cuál es la tendencia en la calidad del aire?	Empeoramiento	Estable	Mejoramiento	Tendencia altamente mejorada
Certidumbre de datos: ¿Cuál es el nivel de calidad de los datos?	Bajo	Medio	Alto	No Aplica



Cuadro 10. Matriz multicriterio aplicada a enfoque de riesgo a la vegetación

Factores de Riesgo a la vegetación	Criterios de valoración			
	4	3	2	1
	Alta	Media	Baja	Muy baja
Magnitud de emisiones por comuna: ¿Cuál es la magnitud que tienen las emisiones totales en la comuna donde se localiza la estación de monitoreo?	t/año	t/año	t/año	t/año
SO ₂	> 10000	<=10000 y >2000	<=2000	Sin emisiones
NO _x	>1000	<=1000 y >200	<=200	Sin emisiones
PTS	>500	<=500 y >100	<=100	Sin emisiones
COV	>100	<=100 y >10	<=10	Sin emisiones
Fuente más cercana: ¿Cuán distante se encuentra la fuente más cercana?	Cerca	Intermedia	Lejos	No Aplica
	km	km	km	km
	<=4	>4 y <=12	>12 y <=40	>40
Segunda fuente más cercana: ¿Cuán distante se encuentra la segunda fuente más cercana?	Cerca	Intermedia	Lejos	Muy Lejos
	km	km	km	km
	<=4	>4 y <=12	>12 y <=40	>40
Vegetación Expuesta: ¿Cuáles son las características de la zona?	Rural Agrícola	Rural No Agrícola	Rural-Urbano	Urbano
	Saturada	Latente	Regular	Buena
Estado Calidad del Aire: ¿Cuál es el estado de la calidad del aire?	Igual o superior a norma o estándar secundario	Inferior a norma o estándar secundario, pero superior a 80% de norma o estándar secundario	Inferior a 80% de norma o estándar secundario, pero superior estándar más estricto.	Niveles inferiores al estándar más estricto.
	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
SO ₂	DS 185: >=80 anual; >=365 diaria; >=1000 horaria	DS 185: <80 anual; <365 diaria; <1000 horaria	DS 185: <72 anual; <292 diaria; <800 horaria	OMS: 30 anual cultivos; 20 anual forestal y vegetación nativa
NO ₂	OMS: >=30 anual; >=75 diario	OMS: <24 anual; <60 diario	OMS: <30 anual; <75 diario	OMS: <15 anual; <37,5 diario
	mg/m ³ .h	mg/m ³ .h	mg/m ³ .h	mg/m ³ .h
O ₃	OMS: AOT40 >=6 (3 meses) Cultivo y veg. Semi nativa >=1 (5 días) daño visible Cultivos	OMS: AOT40 <6 (3 meses) Cultivo y veg. Semi nativa <1 (5 días) daño visible Cultivos	OMS: AOT40 <4,8 (3 meses) Cultivo y veg. Semi nativa <0,8 (5 días) daño visible Cultivos	OMS: AOT40 <3 (3 meses) Cultivo y veg. Semi nativa. <0,5 (5 días) daño visible Cultivos
Meteorología: ¿Cuál es su incidencia en la dispersión y/o transporte de los contaminantes?	Mala	Regular	Buena	Muy Favorable
Tendencia de la calidad del aire: ¿Cuál es la tendencia en la calidad del aire?	ascendente	estable	descendente	Tendencia altamente mejorada
Certidumbre de datos: ¿Cuál es el nivel de calidad de los datos?	Bajo	Medio	Alto	No Aplica

A través del uso de software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS 9.1, se obtuvo a partir de los índices de riesgo, el nivel de riesgo por contaminante en cada zona donde se encuentran las estaciones de monitoreo de calidad del aire, expresado en las siguientes ecuaciones 10 y 11:



NR_{SP} : Nivel de Riesgo para la salud de la población:

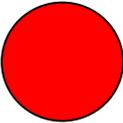
$$NR_{SP} = \text{Log} (IR_{SP}) \quad (10)$$

NR_V : Nivel de Riesgo para la vegetación:

$$NR_V = \text{Log} (IR_V) \quad (11)$$

Los niveles de riesgo a su vez fueron jerarquizados de acuerdo a la siguiente tipología en:

Cuadro 11. Jerarquización de Riesgos.

Nivel de Riesgo Alto 	Corresponde al tercio superior del rango de los valores para Nivel de Riesgo (NR_{SP} o NR_V)	Existe mayor probabilidad de observar efectos adversos para la salud de la población y/o la vegetación por la exposición al contaminante. Se deben adoptar medidas inmediatas tendientes a disminuir los niveles de contaminación y controlar las emisiones antropogénicas. Los proyectos futuros deben contemplar planes de compensación de emisiones.
Nivel de Riesgo Medio 	Corresponde al tercio medio del rango de los valores para Nivel de Riesgo (NR_{SP} o NR_V)	Existe riesgo moderado para la salud de la población y/o la vegetación por la exposición al contaminante. Se requiere adoptar medidas de carácter preventivo, tendientes a monitorear el estado de la calidad del aire y sus tendencias.
Nivel de Riesgo Bajo 	Corresponde al tercio inferior del rango de los valores para Nivel de Riesgo (NR_{SP} o NR_V)	Existe una menor probabilidad de observar efectos adversos para la salud de la población y/o la vegetación por la exposición al contaminante. Se requiere mantener monitoreo de los niveles de calidad del aire
Se entiende el rango como la diferencia entre $NR_{SP \text{ máximo}} - NR_{SP \text{ mínimo}}$ o también $NR_V \text{ máximo} - NR_V \text{ mínimo}$		



5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Meteorología del área de estudio

Se presenta a continuación el análisis de las variables meteorológicas medidas en las estaciones del área de estudio: radiación solar, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento y humedad relativa.

5.1.1. Radiación solar

Para los años 2004 y 2007 la zona en estudio presenta en promedio 15 horas diarias de exposición a la radiación solar. Nehuenco en Quillota y Santa Margarita en Concón, presentan sus máximas promedio diarias alrededor de las 14.00 h con valores que superan los 700 Watt/m² de intensidad (Figura 4), tal es el caso de Nehuenco en 2004 con un promedio de 727 (± 349) Watt/m² y Concón Santa Margarita en 2007 con 702 (± 296) Watt/m². Planta La Calera presenta valores promedio inferiores con un promedio máximo a las 12.00 h de 609 (± 259) Watt/m².

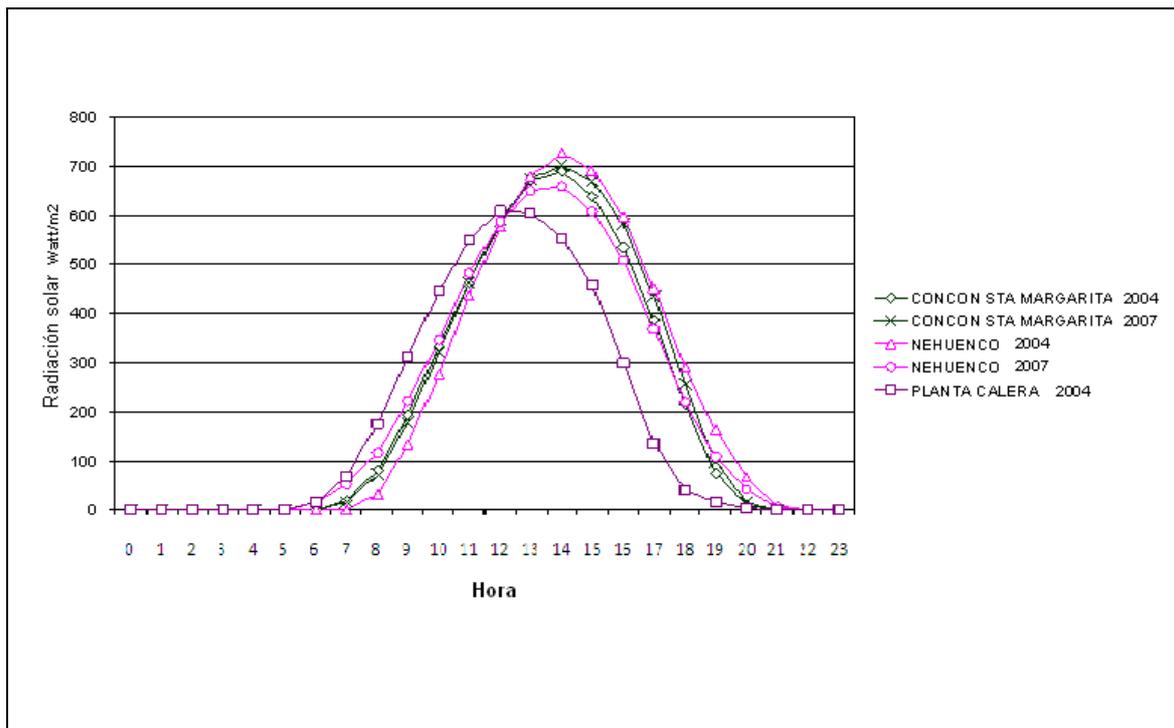


Figura 4. Ciclo diario de la radiación solar horaria promedio para los años 2004 y 2007.

Respecto a la estacionalidad de la radiación solar, se observa que en julio de 2004 y 2007 la radiación en todas las estaciones estudiadas no superan un promedio máximo de 450 Watt/m²;



mientras que en enero la intensidad máxima promedio llega a los 1115 (\pm 111) Watt/m² en Nehuenco (Figura 5).

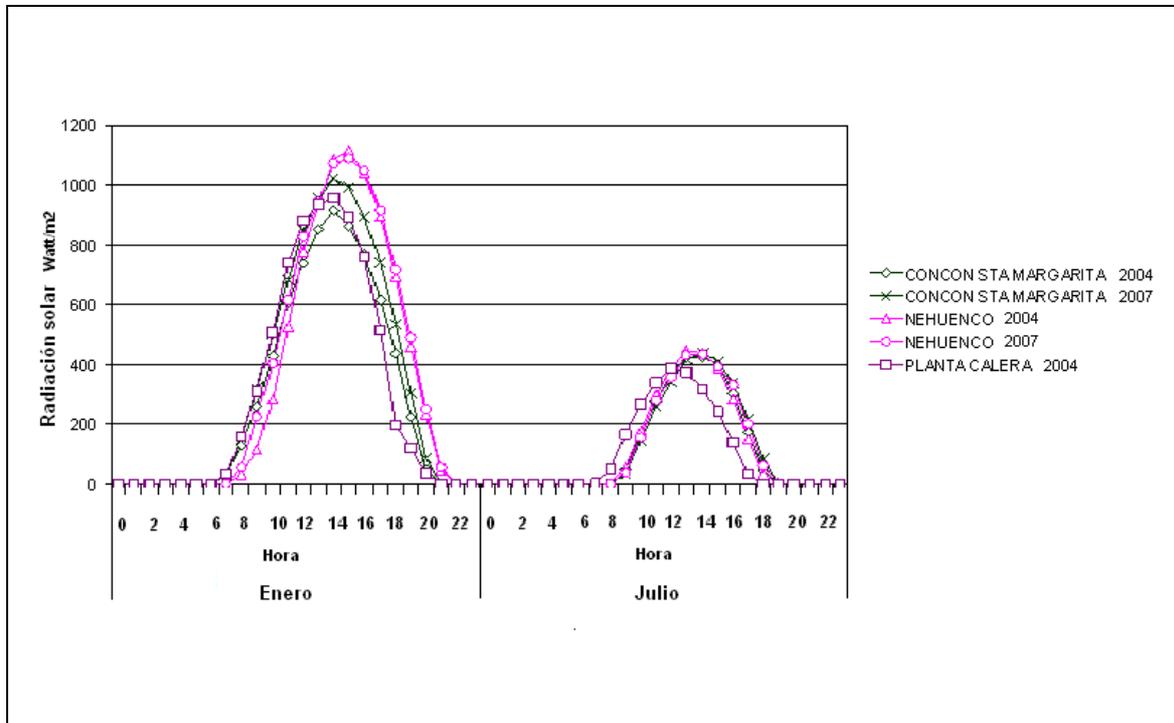


Figura 5. Ciclo diario de la radiación solar horaria promedio para los meses de enero y julio de los años 2004 y 2007.

5.1.2. Temperatura

De acuerdo a los datos de las estaciones meteorológicas analizados, según sus respectivos períodos de medición entre los años 1998 y 2008, el área de estudio presenta un patrón de temperatura fluctuante con marcado comportamiento estacional, con temperaturas promedio que oscilan entre 10 °C en los meses fríos y 20 °C en los meses cálidos (Figura 6).

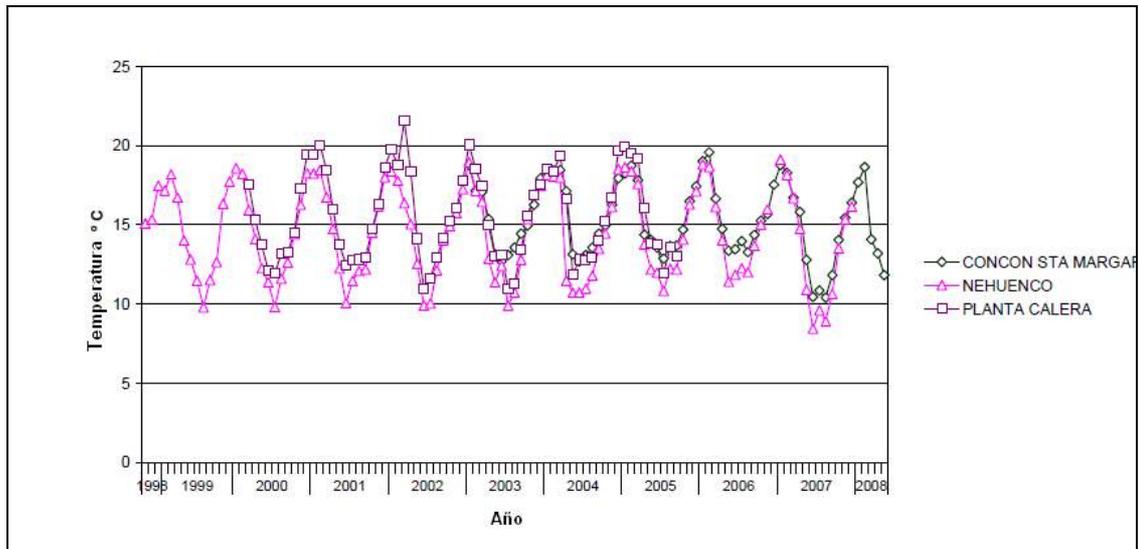


Figura 6. Ciclos anuales de la temperatura mensual promedio para los años 1998 al 2008.

El patrón de comportamiento diario promedio para el año 2005, muestra que las temperaturas más bajas se presentan alrededor de las 06.00 h a 07.00 h. Por ejemplo en la estación Neuenco se observa una temperatura mínima promedio a las 07.00 h de $10 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ mientras que las más altas alrededor de las 15.00 h, por ejemplo en Neuenco se observa una temperatura promedio de $20 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ (Figura 7).

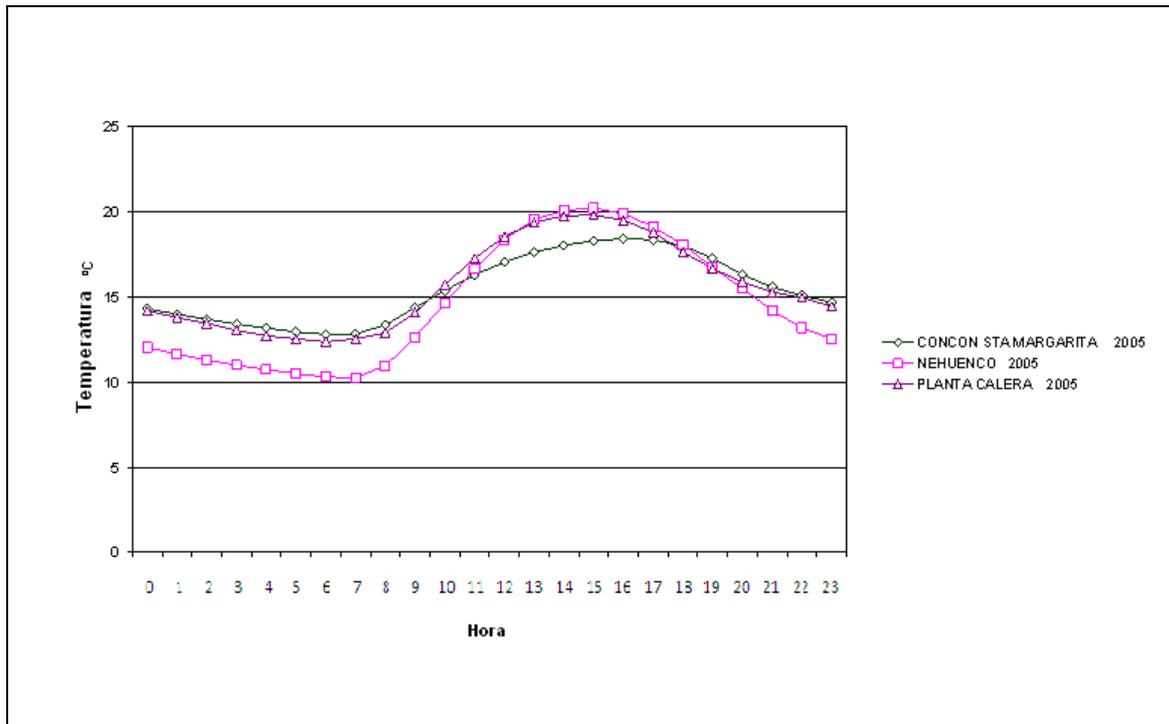


Figura 7. Ciclo diario de la temperatura horaria promedio para el año 2005.

En el mismo año se observa que Planta La Calera presenta rangos de temperaturas promedio con valores que oscilan entre los 13 °C y 20 °C, mientras que Nehuenco en Quillota, presenta valores promedio entre 10 °C y 20 °C. Por su parte Santa Margarita en Concón presenta temperaturas más moderadas con valores que en promedio fluctúan entre 13 °C y 18 °C. Se constata además que tanto Planta La Calera como Nehuenco presentan una tendencia decreciente a partir de las 15.00 h (máximo diario), mientras que en Santa Margarita la temperatura comienza a descender a partir de las 17.00 h. Tales diferencias se pueden atribuir tanto al efecto moderador de la influencia marina en Concón, como a la presencia de cordones cordilleranos en la zona de La Calera y Quillota, situadas hacia el interior del valle. La estacionalidad también influye en las oscilaciones diarias de la temperatura (Figura 8), mostrando que tanto en julio como en enero, Nehuenco presenta el mayor rango de fluctuación de la temperatura. En julio presenta mínimas de 8 (\pm 4) °C a las 07.00 h y máximas de 16 (\pm 3) °C a las 15.00 h; en el mes de enero las mínimas alcanzan en promedio los 12 (\pm 2) °C a las 07.00 h y las máximas los 25 (\pm 3) °C a las 16.00 h; Concón presenta valores menos extremos; en julio el valor promedio mínimo es 10 (\pm 3) °C a las 08.00 h y el máximo de 16 (\pm 3) °C a las 16.00 h; en verano el promedio mínimo es de 15 (\pm 2) °C a las 06.00 h y el máximo de 22 (\pm 3) °C a las 18.00 h.

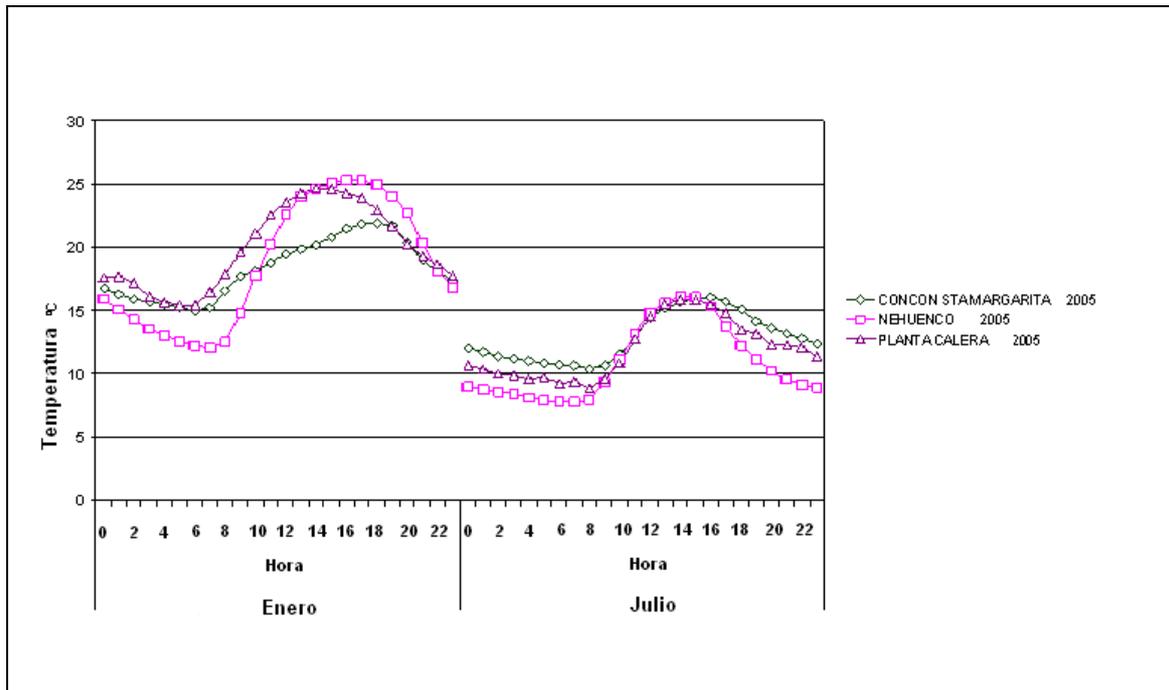


Figura 8. Ciclo diario de la temperatura horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2005.

5.1.3. Precipitaciones

Los datos de precipitación obtenidos de la estación meteorológica de Nahuenco para los años 2006 y 2007 se concentran principalmente en los meses fríos, de mayo a septiembre, y en la estación seca se extiende entre septiembre y abril (Figura 9). Las precipitaciones tienen incidencia en el lavado de partículas a través de su remoción mecánica y en el lavado de gases contaminantes a través de la precipitación húmeda.

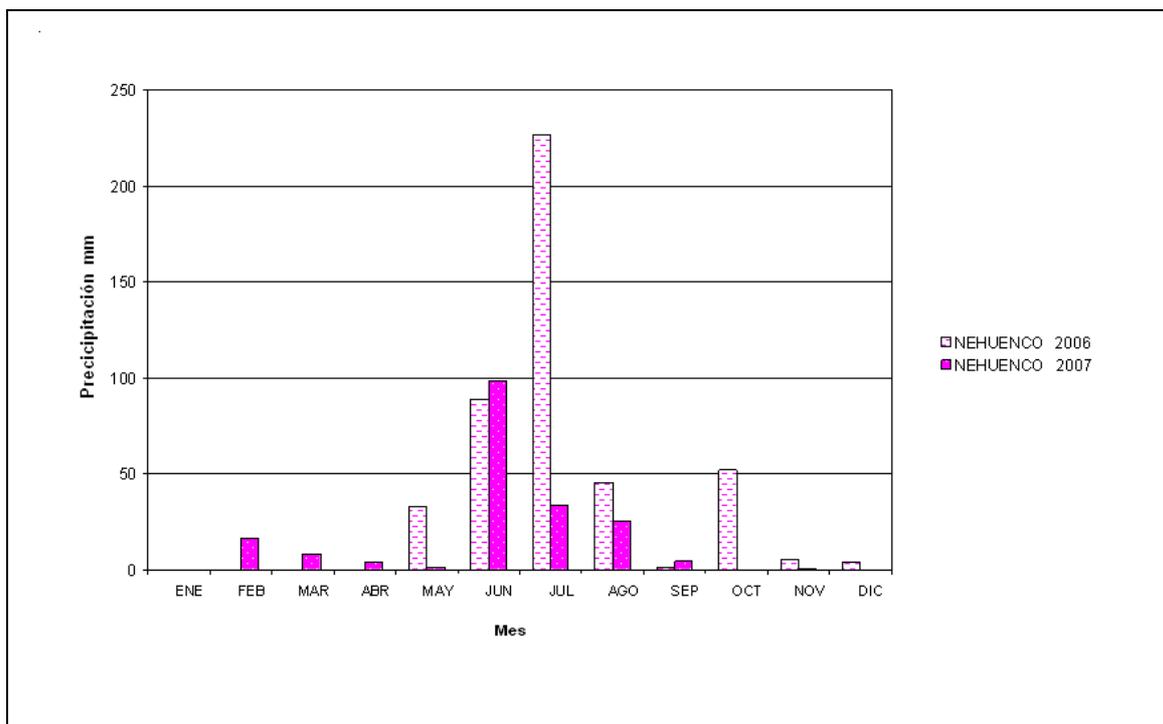


Figura 9. Precipitación mensual en las estaciones de la red Nehuenco. Años 2006 – 2007.

5.1.4. Velocidad del Viento

Los vientos presentan una variación en su intensidad de acuerdo a la estacionalidad, con velocidades altas en los meses cálidos y más bajas en los meses fríos. De acuerdo a datos del año 2006 se aprecia que en general la zona se caracteriza por vientos de baja intensidad durante la mañana (00.00 h – 08.00 h) elevándose conjuntamente con el incremento de la radiación solar alcanzando máximos entre las 15.00 h y 17.00 h, para luego comenzar a disminuir (Figura 10). En Chagres (Catemu) se presentan velocidades de magnitud superior respecto al resto de las estaciones de monitoreo, observándose los cambios más extremos en la velocidad del viento, donde a las 16.00 h se alcanza un promedio de 7,1 ($\pm 3,1$) m/s, mientras que a las 07.00 h disminuye notoriamente a 2,1 ($\pm 1,4$) m/s (Figura 10). Por el contrario en Concón, se observan variaciones diarias, menos significativas.

Se observa que la variación diaria de la velocidad tiene un comportamiento diferenciado de acuerdo a la estación del año. En enero las intensidades promedio son de mayor magnitud, respecto al mes de julio (Figura 11), por ende existen mejores condiciones de dispersión en verano que en invierno.

En síntesis los vientos de mayor intensidad ocurren en la parte superior de la cuenca en estudio, con máximas velocidades en la zona de Chagres, situación que se puede explicar por el encajonamiento de la cuenca.

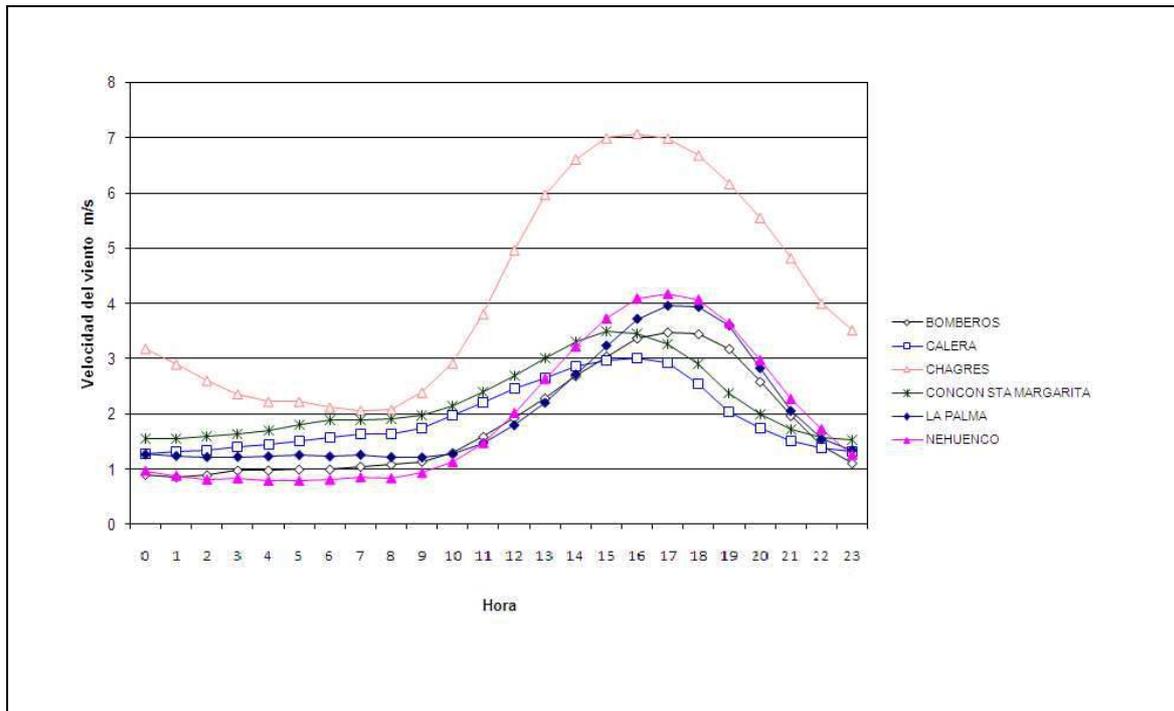


Figura 10. Ciclo diario de la velocidad del viento horaria promedio para el año 2006.

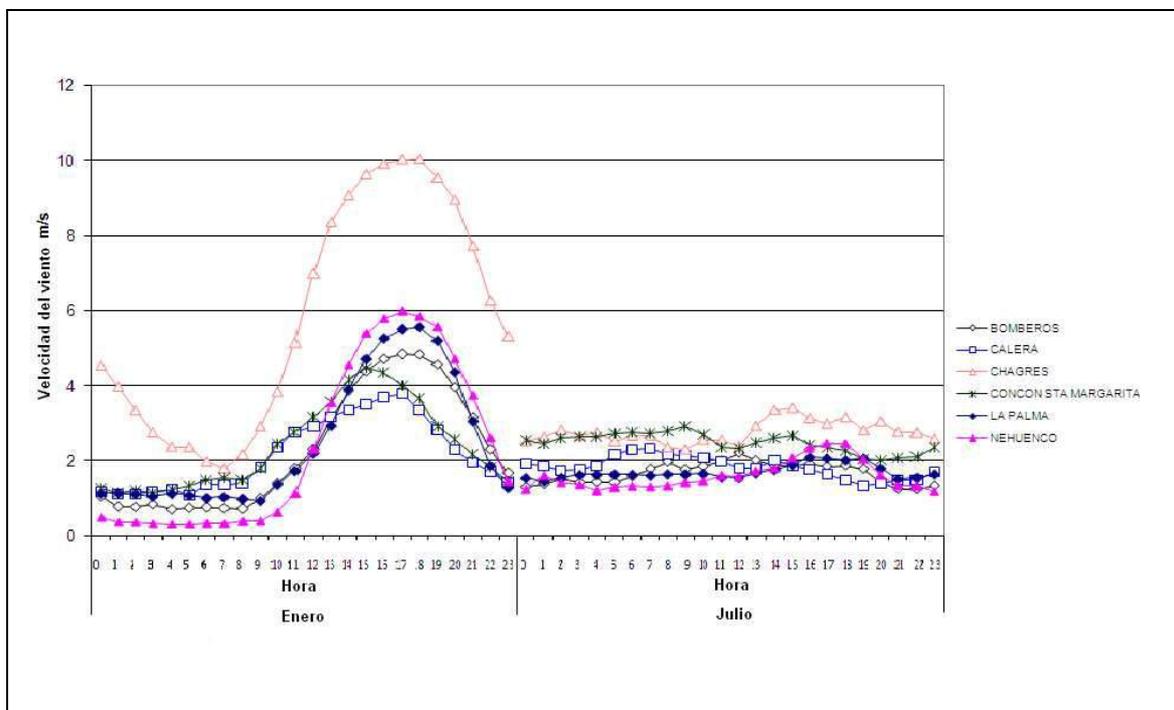


Figura 11. Ciclo diario de la velocidad del viento horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2006.



5.1.5. Dirección del Viento

La Figura 12 muestra que en 2006 el régimen de vientos se distingue en flujos diurnos y nocturnos. La dirección predominante corresponde a vientos de componente SE, S y SW entre las 22.00 h y 07.00 h (100° - 200°). En las horas de la tarde entre las 12.00 h y 18.00 h se presentan vientos de componente S, SW y W (170° - 270°).

La dirección del viento se relaciona con la orientación de la cuenca a lo largo de sus diferentes tramos; ésta presenta una orientación de mar a cordillera en dirección NE, con una inflexión en La Calera donde adquiere una orientación E, por lo que la topografía de la cuenca influencia patrones de dirección de los vientos diferenciado para las zonas de Concón y Quillota respecto de La Calera, Hijuelas, Llay Llay y Catemu. En las estaciones de la red ENAP en Concón predominan vientos de componentes WNW-ESE. Las Gaviotas y Colmo presentan vientos predominantes de orientación N-E. En Nehuenco los vientos tienen una clara orientación W, mientras que en La Palma se orientan en dirección WSW. En La Cruz la orientación predominante es SSE-N-NNE. Tanto en Planta La Calera como en estación La Calera se observa una marcada orientación SW-NE. En Hijuelas predomina una orientación WSW, mientras que llegado a Chagres los vientos predominan en dirección SSW, en dirección de la cuenca hacia Panquehue. Las figuras 13 y 14 muestran el desplazamiento de los vientos en el área de estudio.

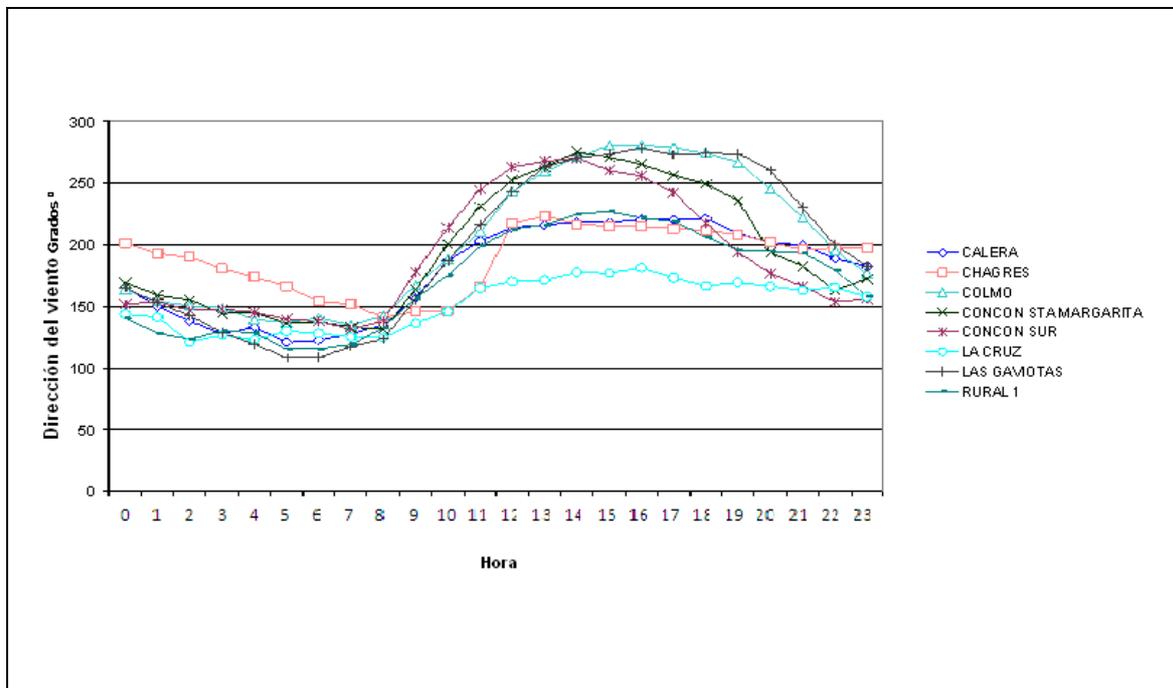


Figura 12. Ciclo diario de la dirección del viento horaria promedio para el año 2006.

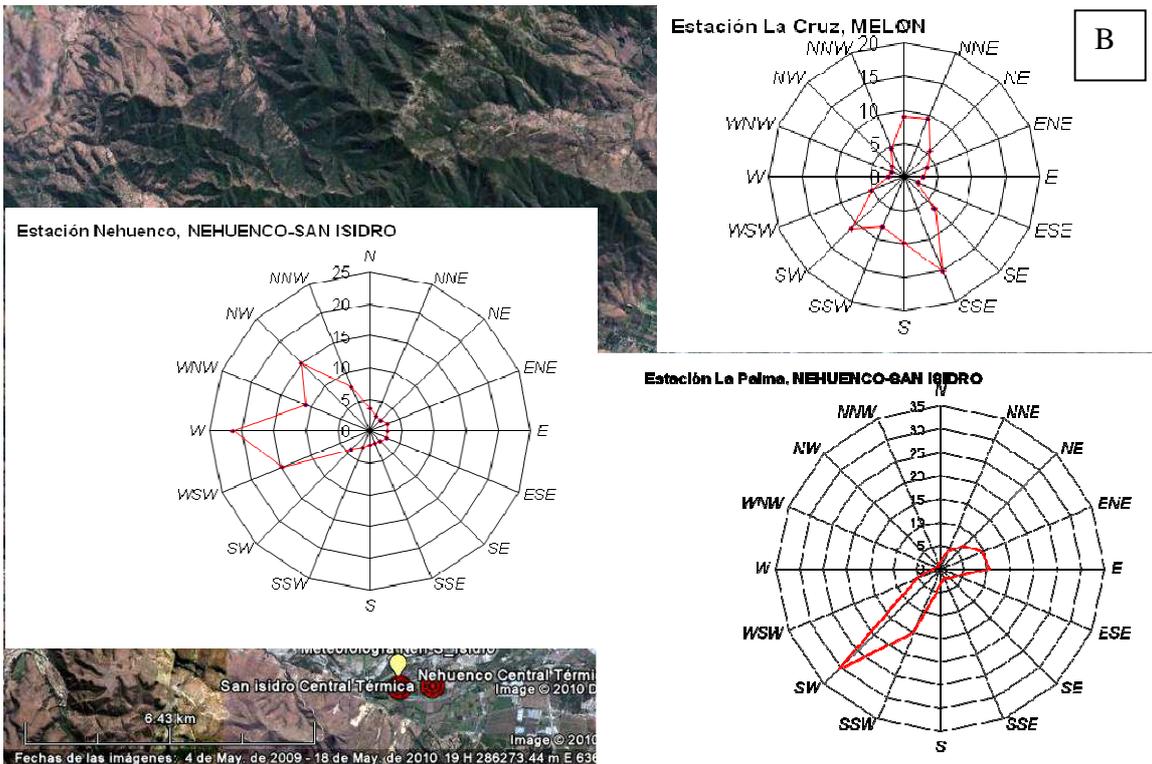
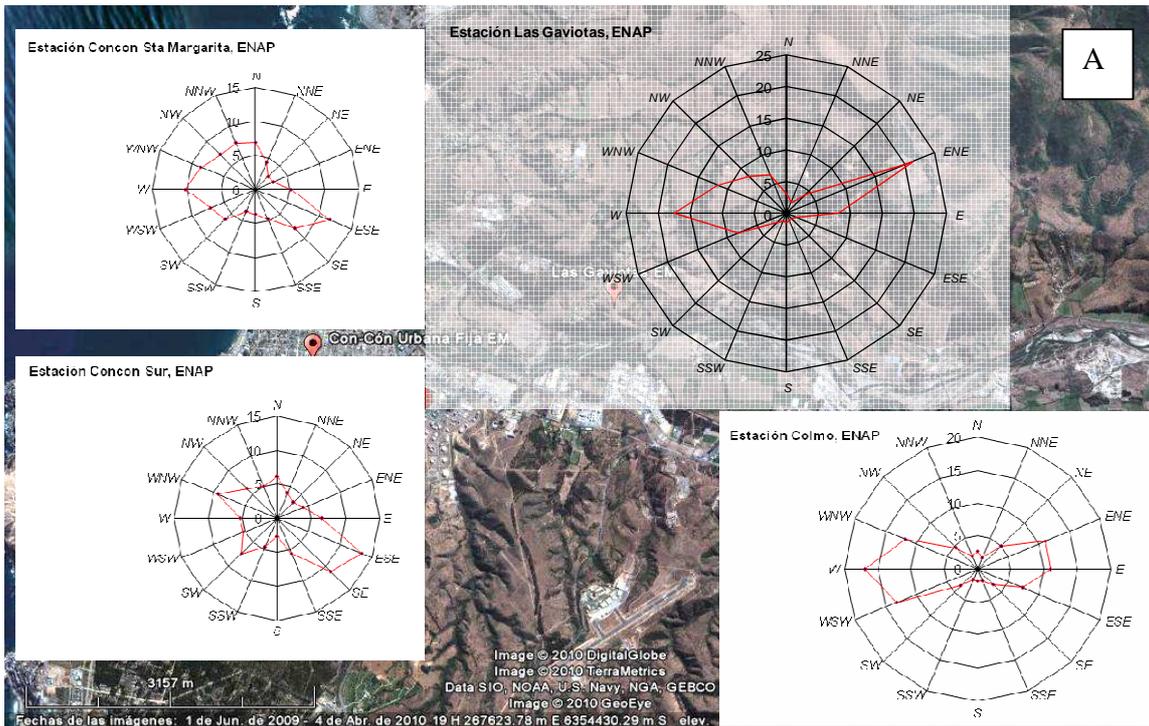


Figura 13. Desplazamientos de los vientos área de estudio: a) Concón; b) Quillota, La Cruz.

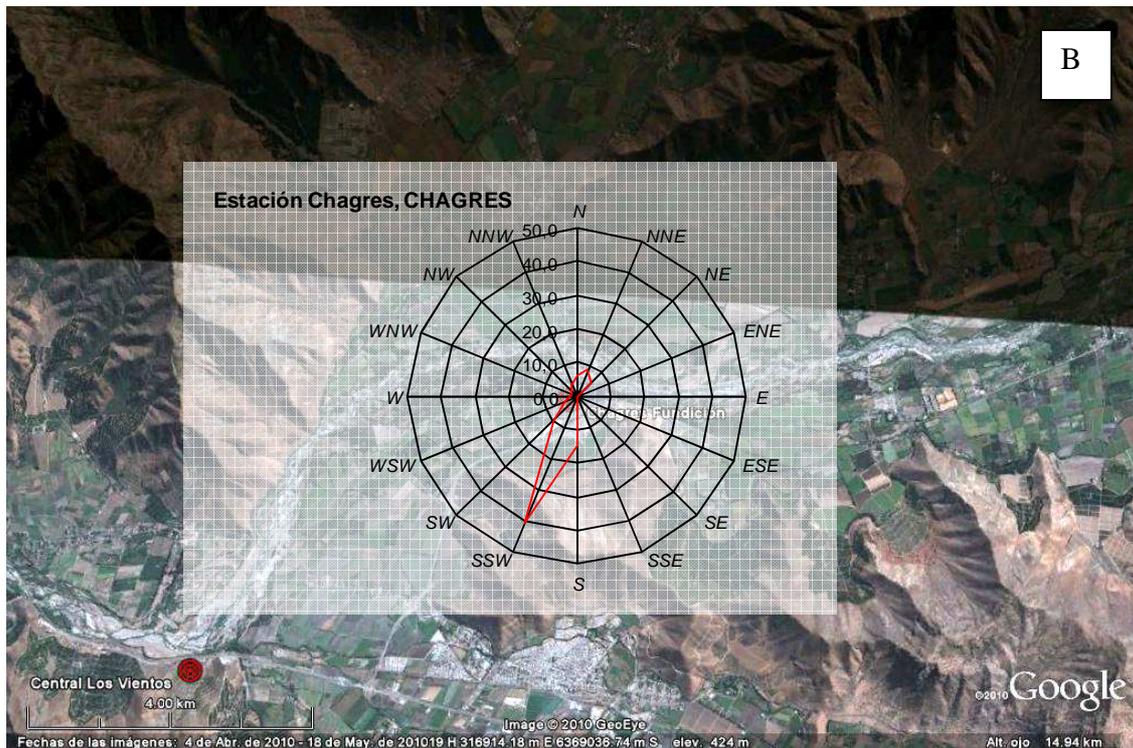
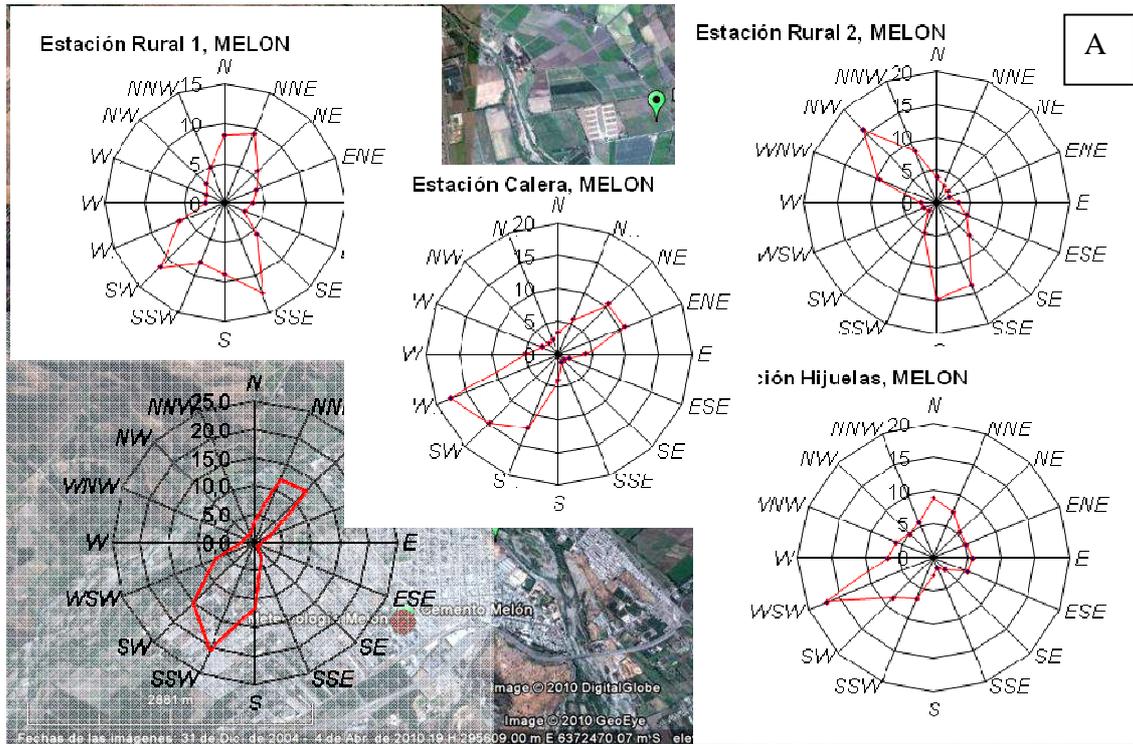


Figura 14. Desplazamiento de los vientos área estudio: a) La Calera; b) Llay Llay, Catemu.



5.1.6. Humedad Relativa (HR)

Los datos de HR del año 2005 indican que, en general, en cada una de las estaciones estudiadas existe mayor HR en las horas tempranas del día, encontrando sus valores más altos entre las 06.00 h y 07.00 h, disminuyendo sostenidamente a partir de las 09.00 h hasta un mínimo entre las 14.00 h y 17.00 h. En Concón las mínimas se registran en promedio a las 16.00 h. Concón es la zona más húmeda con oscilación diaria entre 95% (máxima) y 66% (mínima). En Quillota las variaciones promedios diarias están entre 92% (máxima) y 60% (mínima). La zona que presenta menor HR corresponde a La Calera donde oscila entre 77% (máxima) y 52% (mínima) (Figura 15). La estabilidad de la HR en Concón se debe a su cercanía a la costa. Las zonas interiores presentan menor HR en la medida que disminuye la influencia marina. La humedad relativa alta ofrece condiciones favorables para la disminución de las concentraciones de gases y partículas. La influencia estacional incide mayormente en diferencias de HR en las estaciones de La Calera y Nehuenco, no así en Concón, donde no se aprecian mayores diferencias en el patrón de comportamiento de la humedad entre verano e invierno (Figura 16).

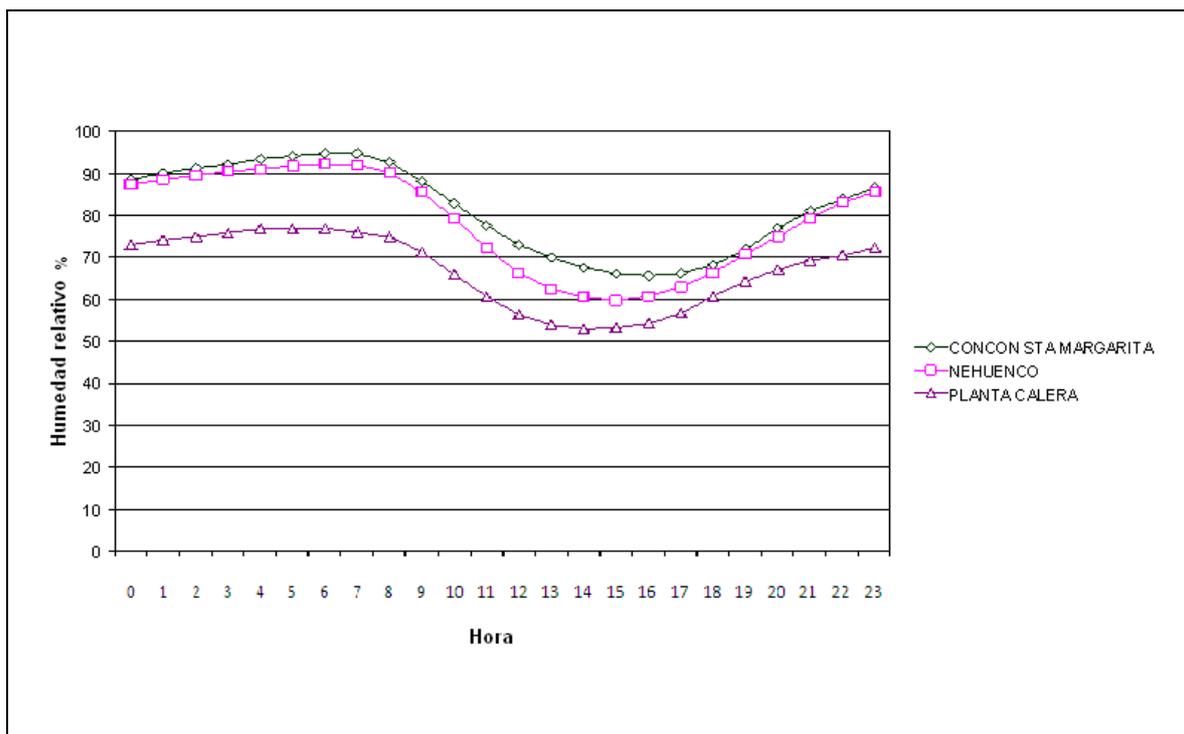


Figura 15. Ciclo diario de la humedad relativa horaria promedio para el año 2005.

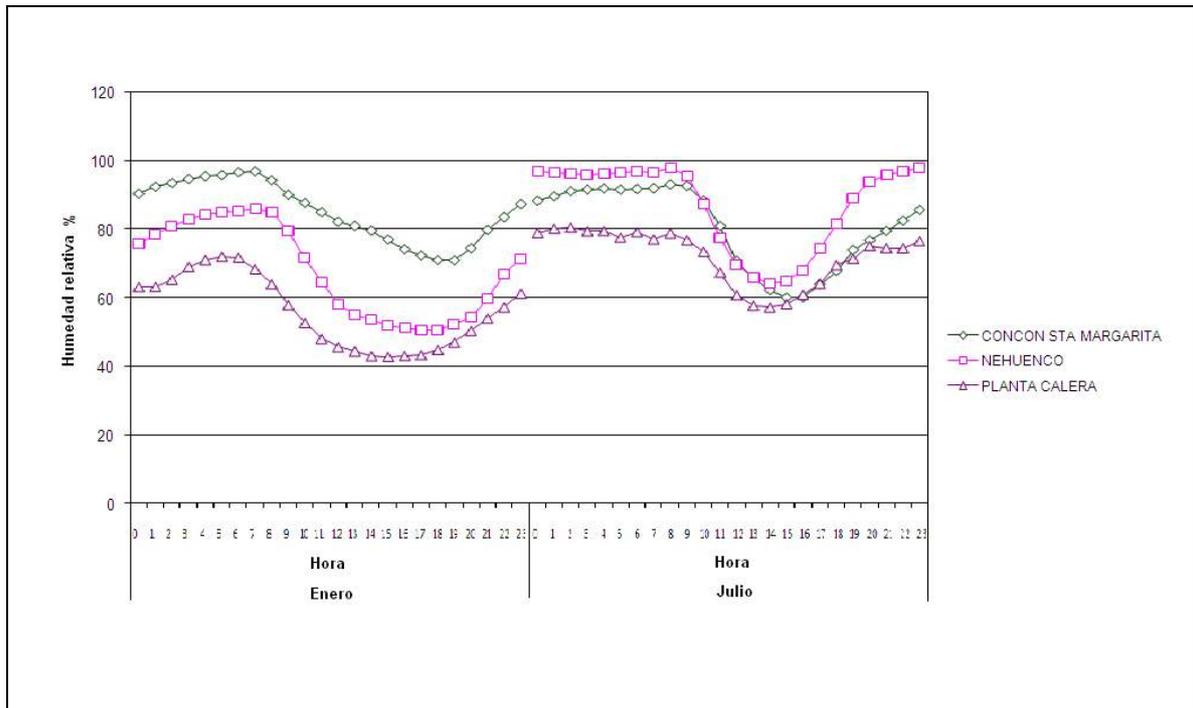


Figura 16. Ciclo diario de la humedad relativa horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2005.

5.1.7. Descripción de la cuenca

Los datos de meteorología analizados muestran concordancia con lo indicado por CENMA (2001) respecto a los flujos de aire en la cuenca los cuales son conducidos a través de ella en dirección NE hacia las zonas más altas durante el régimen diurno y en dirección SW en régimen nocturno. Se observan a su vez bajas temperaturas y bajas velocidades promedio del viento en otoño e invierno al contrario de lo observado en los meses estivales. La meteorología de la cuenca manifiesta un comportamiento cíclico a escala estacional y diaria, pero diferenciado en términos espaciales, reflejado en las mediciones de la radiación solar, temperatura atmosférica, humedad relativa y vientos.

El área de estudio se puede caracterizar por tres zonas, como se observa en la Figura 17:

Subzona Costera: Es la subzona de la parte baja de la cuenca del río Aconcagua con mayor influencia marina, caracterizada por temperaturas más estables, alta HR, valle angosto en orientación E (de mar a cordillera), de relieve poco pronunciado, cuyos vientos de velocidad moderada predominan de dirección W durante el día y E durante la noche, no descartándose el aporte de vientos provenientes desde la zona industrial de Quintero. Comprende desde la desembocadura del río Aconcagua incluyendo las partes altas de las laderas norte (Las Gaviotas) y sur (zona urbana de Concón), hasta el sector de Lo Venecia donde se localiza el complejo



termoeléctrico Nehuenco - San Isidro. Presenta condiciones favorables para la dispersión de partículas y gases (SO_2 y NO_x), salvo hacia el sector de Lo Venecia a primeras horas del día durante el invierno. La alta radiación solar en las estaciones cálidas sumado a la existencia de fuentes emisoras de NO_x e HC antropogénicos y biogénicos, indica condiciones favorables a la generación de O_3 .

Subzona Intermedia: Es la subzona intermedia que presenta alta radiación solar, con temperaturas que en promedio oscilan diaria y anualmente con considerable amplitud, con valores mínimos en los meses más fríos, que apenas superan los 6 °C; HR con marcado debilitamiento conforme se aleja de la costa que pasa de estaciones frías a cálidas; velocidad del viento que se incrementa hacia La Calera, de dirección SW en el día y NE en la noche, siguiendo la orientación de la cuenca hasta La Calera, lugar de confluencia del estero El Melón con el río Aconcagua, donde la influencia atmosférica de la cuenca del Melón, refuerza la intensidad de los vientos en dirección SW en el día y NW en la noche hasta el sector de Romeral lugar de confluencia de la cuenca de Ocoa donde la cuenca nuevamente se reorienta en dirección hacia el NEE. La subzona se caracteriza por un ensanchamiento de la cuenca e incremento del relieve característico de una zona influenciada por la cordillera de la costa. Su localización intermedia, la presencia de un relieve pronunciado y la conjugación de 3 cuencas en La Calera favorecen condiciones de recirculación de los contaminantes. La alta radiación solar en las estaciones cálidas sumado a la existencia de fuentes emisoras de NO_x e HC antropogénicos y biogénicos, indica condiciones favorables a la generación de O_3 .

Subzona Cordillerana: Es la tercera subzona caracterizada por el angostamiento de la cuenca desde Romeral hasta Llay Llay y Catemu, lo que sumado al incremento de las masas de aire provocan un notable incremento en la velocidad de los vientos, los que alcanzan en los meses más cálidos velocidades en promedio de hasta 6 m/s. En los meses fríos los vientos disminuyen radicalmente hasta los 2 m/s, debido a la disminución de la radiación solar y al descenso de la capa de inversión térmica. Ofrece mejores condiciones de ventilación de los contaminantes durante los meses cálidos y más desfavorables en los meses fríos. No hay información de la HR, no obstante, de manifestarse las tendencias observadas en La Calera debiese existir menor HR que en las zonas con influencia costera.

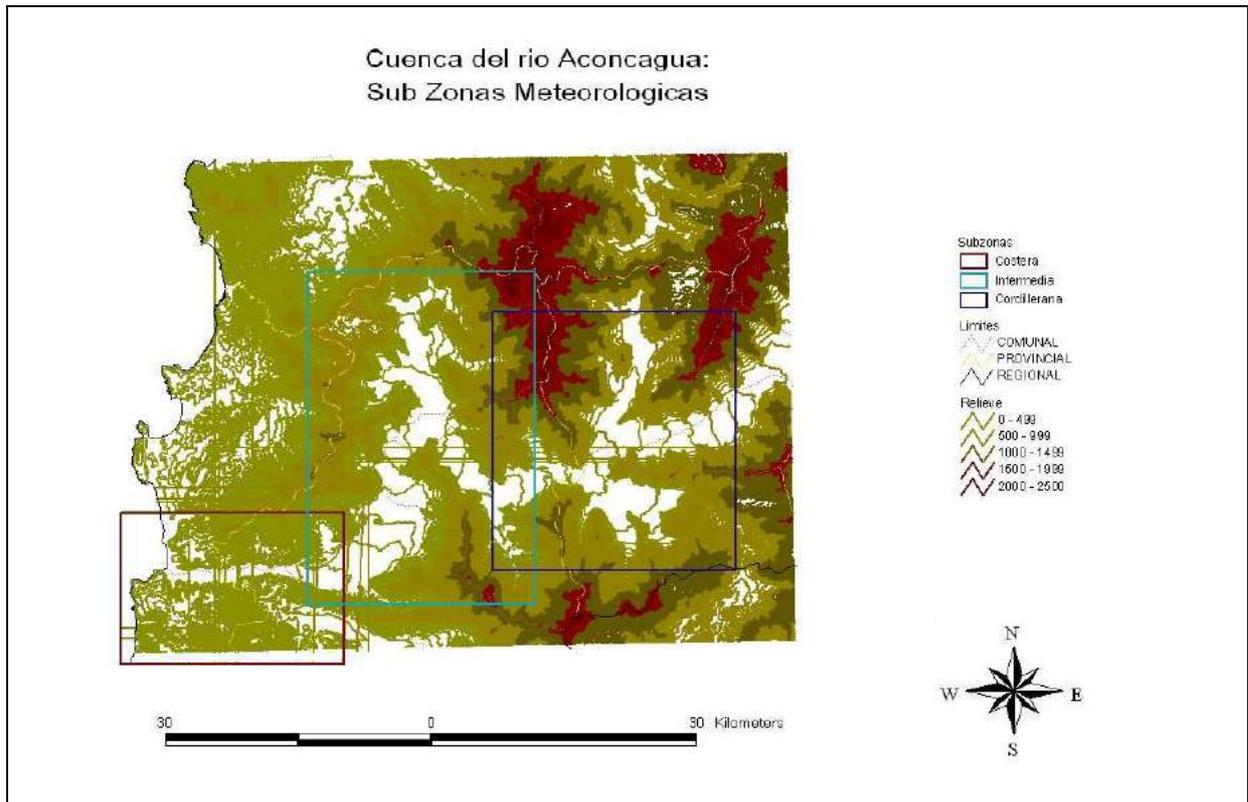


Figura 17. Cuenca del río Aconcagua: Sub Zonas Meteorológicas

5.2. Comportamiento de los contaminantes

5.2.1. Dióxido de Nitrógeno, NO₂

La Figura 18 muestra que en el período 1998 - 2008, el perfil diario de concentraciones de NO₂ presenta un comportamiento cíclico. Las concentraciones de NO₂, disminuyen desde las primeras horas de la noche (19.00 h a 22.00 h) hasta las primeras horas del día siguiente (03.00 h a 07.00 h) como se observa en La Calera cuyo promedio horario de 32 (± 23) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19.00 h desciende a 16 (± 14) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 04.00 h. Este comportamiento puede deberse a la reacción entre NO₂ y O₃ remanente, y la consiguiente producción de NO₃ que con la humedad genera HNO₃. A partir de las primeras horas del día (06.00 h y 08.00 h) se evidencia un aumento en las concentraciones de NO₂, atribuible a emisiones desde procesos de combustión, incremento que se sostiene hasta alrededor del medio día entre las 10.00 h y las 12.00 h, donde estaciones como La Calera y Bomberos a las 10.00 h presentan concentraciones promedio de 22 (± 16) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 21 (± 17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. A partir del medio día el incremento de la radiación solar, y la presencia de COV, disminuirían las concentraciones de NO₂ a sus valores mínimos durante la tarde (15.00 h a 18.00 h), observándose en estaciones como Concón y Bomberos a las 16.00 h



concentraciones promedio de $12 (\pm 7) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 (\pm 20) \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente⁶. La tendencia descrita del NO_2 se observa en todas las estaciones de monitoreo, excepto en las estaciones La Calera, Rural 1 e Hijuelas, que en vez de disminuir durante la tarde siguen un ascenso sostenido.

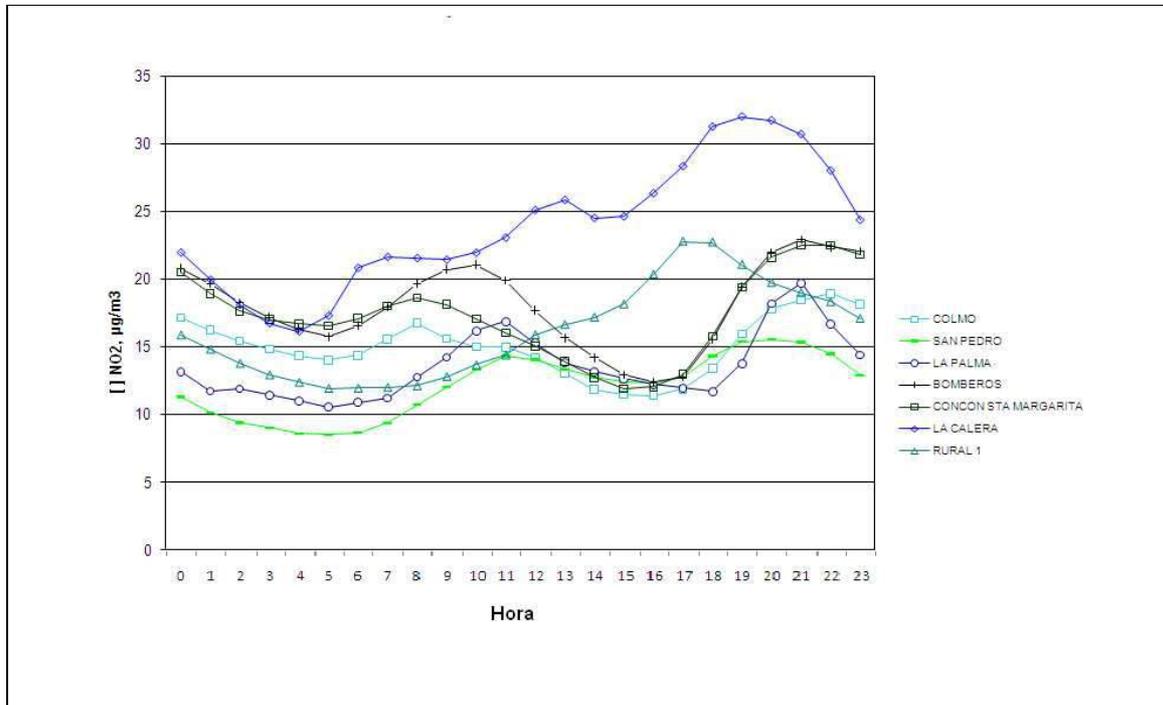


Figura 18. Ciclo diario de la concentración de NO_2 horaria promedio para el período comprendido entre los años 1998 – 2008.

Dicha situación se observa con mayor claridad en el comportamiento promedio horario para el año 2006 indicado en la Figura 19, donde La Calera y Rural 1 presentan curvas diferenciadas respecto de San Pedro, La Palma, Colmo y Bomberos. Lo anterior se explicaría por una menor presencia de COV en la zona de La Calera, debido a menores emisiones antropogénicas. También sería posible suponer menores emisiones de COV biogénicos en dicha zona producto de una menor presencia vegetal. Al caer la tarde, la concentración de NO_2 se incrementa a su máxima concentración horaria promedio en el día, donde La Calera presenta un valor a las 19.00 h de $32 (\pm 26) \mu\text{g}/\text{m}^3$ para luego descender hasta el día siguiente para retomar el ciclo diario.

El comportamiento horario promedio para el año 2006 expuesto en la Figura 19, permite comparar las magnitudes de las concentraciones de NO_2 . Durante la mañana las mayores

⁶ La desviación estándar mayor que el promedio, es producto de la alta dispersión de la muestra analizada.



concentraciones se producen en La Calera, Bomberos, y Colmo, con valores que alcanzan a las 07.00 h en promedio $21(\pm 18) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $20(\pm 27) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $18(\pm 13) \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Al medio día las mayores concentraciones se observan en La Calera, Bomberos y La Palma, con valores promedio a las 12.00 h de $27 (\pm 19) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26 (\pm 33) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $23 (\pm 20) \mu\text{g}/\text{m}^3$; esta última experimenta un notorio incremento respecto de la mañana, atribuible al desplazamiento de masas de aire procedentes de Quillota. Durante la tarde la mayor concentración se observa en La Calera que a las 17.00 h en promedio es $27 (\pm 18) \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que a la misma hora Bomberos presenta una notoria disminución con $20 (\pm 32) \mu\text{g}/\text{m}^3$, al igual que La Palma con $14 (\pm 16) \mu\text{g}/\text{m}^3$, comportamiento diferenciado que se podría atribuir a la mayor intensidad del viento e incidencia de mayor emisión de COVs en la zona de Quillota que en La Calera⁷.

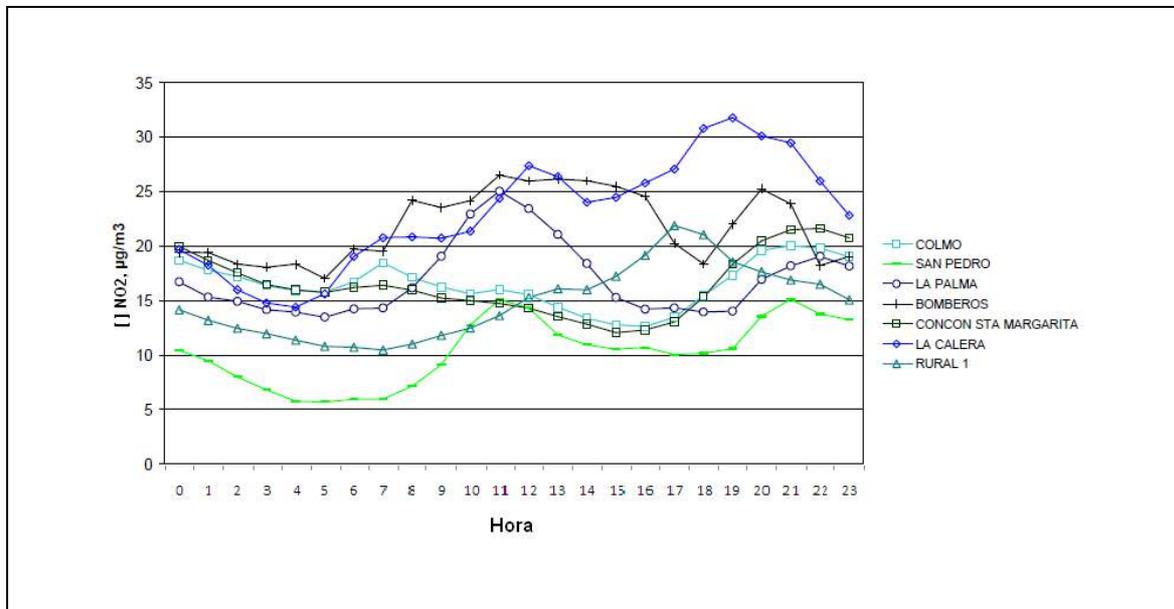


Figura 19. Ciclo diario de la concentración de NO_2 horaria promedio para el año 2006.

La incidencia de las actividades antrópicas en las tendencias diarias de NO_2 se aprecia, al comparar el comportamiento promedio de las concentraciones horarias de NO_2 entre un día hábil y un fin de semana (Figura 20), mientras en La Calera a las 08.00 h de un día miércoles la concentración promedio horaria es de $23 (\pm 18) \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día domingo en idéntico horario se tiene $16 (\pm 13) \mu\text{g}/\text{m}^3$, situación que es similar en todas las estaciones evaluadas.

⁷ Ver figuras 12 y 13.

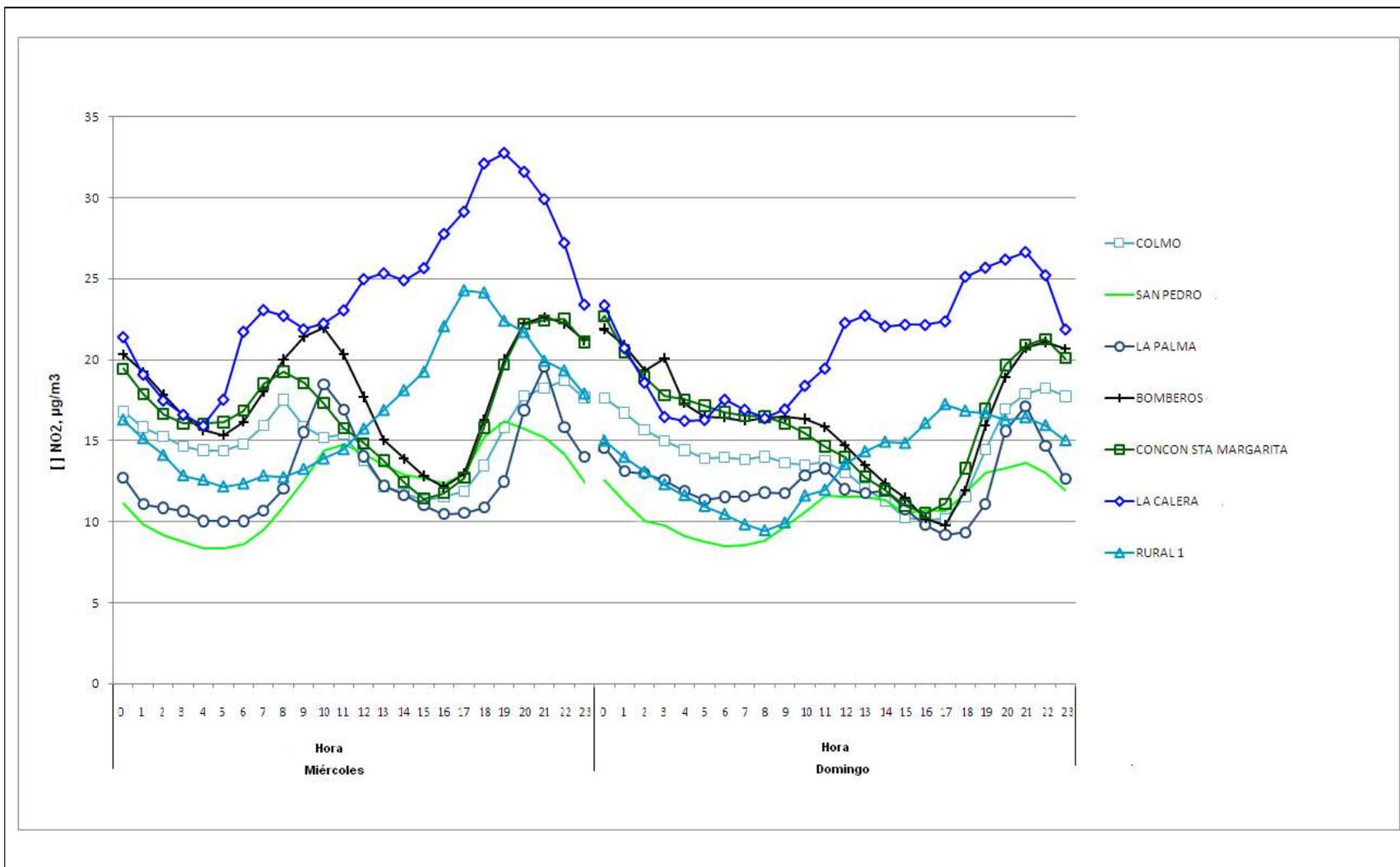


Figura 20. Ciclo diario de la concentración de NO₂ horaria promedio para los días miércoles y domingo del período entre los años 1998 – 2008.



Por otra parte la concentración de NO_2 tiende a ser más elevada en los meses fríos que en los cálidos. Esto se puede explicar por mayores emisiones por quema de combustibles, la menor ventilación en los meses fríos y descenso de la radiación solar que inciden en una acumulación del NO_2 . A la inversa en los meses cálidos la menor concentración de NO_2 en la cuenca se podría explicar por las mejores condiciones de ventilación, la disminución de las actividades antrópicas de combustión domiciliarias, el aumento de la radiación solar y con ello de las reacciones fotoquímicas (Figura 21).

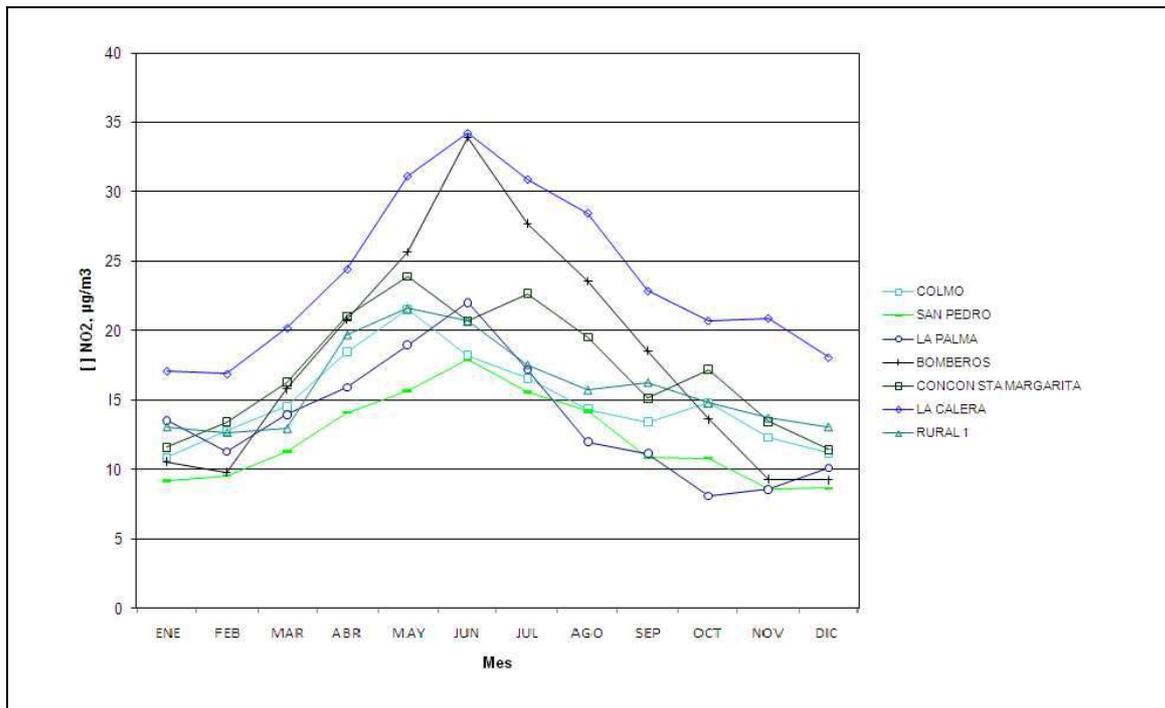


Figura 21. Ciclo anual de las concentraciones de NO_2 mensual promedio para el período comprendido entre los años 1998 – 2008.

En cuanto a las magnitudes de las concentraciones, se observa que la concentración promedio mensual para el año 2006 tanto en La Calera como en Bomberos en Quillota presenta una notoria acumulación de NO_2 en el mes de mayo con $58 (\pm 19) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y junio con $69 (\pm 27) \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (Figura 22).

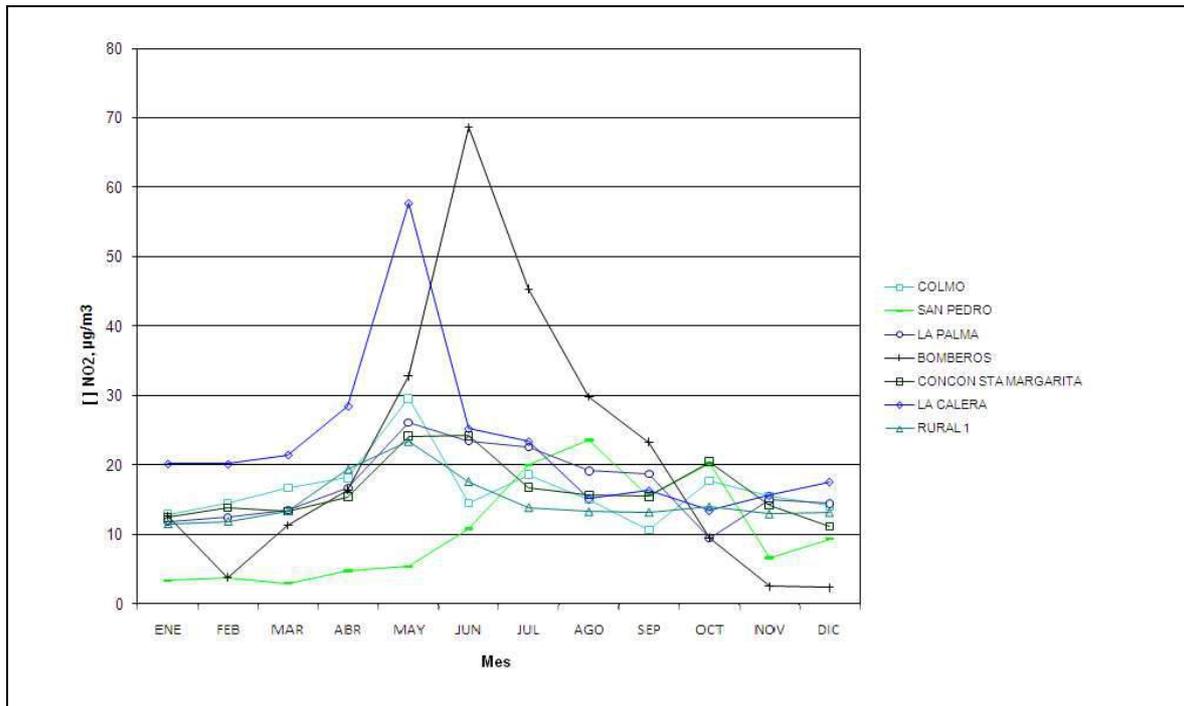


Figura 22. Concentraciones de NO₂ promedios mensuales para el año 2006.

Un análisis de las correlaciones por pares para todas las estaciones, muestra la existencia de correlación significativa entre la mayoría de las estaciones, lo cual supone la influencia de factores comunes espaciales y temporales (Cuadro 12)⁸. Específicamente se observa alta correlación entre La Calera y Rural 1 ($r= 0,626$; $n=2170$; $p<0,01$), se observa también un alta correlación entre Limache y las estaciones Bomberos ($r= 0,711$; $n=458$; $p<0,01$) y San Pedro ($r= 0,678$; $n=457$; $p<0,01$) respectivamente, lo cual daría cuenta de la extensión del área de influencia de las emisiones de NO_x, procedentes desde la zona de Quillota. Llama la atención que Colmo pese a tener una alta correlación con la estación UCV ($r=0,740$; $n= 754$; $p<0,01$) tenga una baja correlación con La Palma ($0,131$; $n= 1057$; $p<0,01$) dado que UCV cuando estuvo operativa se situó en el sector de La Palma en Quillota.

⁸ La ausencia de correlación entre los registros de NO₂ entre La Calera e Hijuelas supone deficiencias en la calidad de las mediciones efectuadas en la estación Hijuelas a lo menos durante el período 1999 – 2000.



Cuadro 12. Correlaciones de Pearson de las concentraciones diarias de NO₂, entre las estaciones, y número de observaciones (N)

		BOMBEROS	CAJON SAN PEDRO	COLMO	CONCÓN- STA MARGARITA	HIJUELAS	LA CALERA	LA PALMA	LIMACHE	QUILLOTA-INP	RURAL 1	SAN PEDRO	UCV
BOMBEROS	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N	1 3159	. ^a 0	,444 1723	,495 1730	,021 510	,230 2951	,346 968	,711 458	. ^a 0	,331 1952	,415 3130	,588 1718
CAJON SAN PEDRO	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N		1 109	. ^a 0	. ^a 0	. ^a 0	. ^a 0	. ^a 0	. ^a 0	,499 109	. ^a 0	,491 109	. ^a 0
COLMO	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N			1 1967	,538 1964	. ^a 0	,500 1890	,131 1057	. ^a 0	. ^a 0	,444 1879	,204 1789	,740 754
CONCÓN-SANTA MARGARITA	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N				1 1974	. ^a 0	,479 1897	,340 1058	. ^a 0	. ^a 0	,443 1886	,427 1796	,635 760
HIJUELAS	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N					1 994	,055 960	. ^a 0	-.005 437	. ^a 0	. ^a 0	,019 992	,512 553
LA CALERA	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N						1 3200	,403 992	,379 426	. ^a 0	,626 2170	,238 2988	,321 1587
LA PALMA	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N							1 1059	. ^a 0	. ^a 0	,312 982	,588 1032	. ^a 0
LIMACHE	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N								1 458	. ^a 0	. ^a 0	,678 457	. ^a 0
QUILLOTA-INP	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N									1 109	. ^a 0	,578 109	. ^a 0
RURAL 1	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N										1 2192	,214 1990	,412 1027
SAN PEDRO	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N											1 3334	,550 1719
UCV	Pearson Corr. Sig. (2-tailed) N												1 1722

** : p>0,01
* : p>0,05

Al observar las series de tiempo para las concentraciones anuales de NO₂ (Figura 23), La Calera es la estación monitora que registra la concentración trianual más elevada, alcanzando en los trienios 2005 – 2007 y 2006 – 2008 valores de 23 µg/m³. En términos generales no se aprecian tendencias crecientes, salvo en las estaciones La Calera, San Pedro y la Palma (continuadora de UCV) que informan una leve alza a partir del trienio 2004 – 2006. Sin perjuicio de ello, en todas las estaciones monitoras, la concentración trianual de NO₂ presenta niveles inferiores al límite primario de 100 µg/m³ normado por el DS 114/2002 y al límite primario de 40 µg/m³ recomendado por la OMS.

No obstante, el promedio trianual del percentil 99 horario (Figura 24), muestra una clara tendencia al alza a partir del trienio 2004 – 2006 en la mayoría de las estaciones de monitoreo evaluadas, siendo Bomberos, San Pedro, La Calera y La Palma (continuadora de UCV) las que presentan las alzas más pronunciadas; de ellas Bomberos es la más elevada con 192 µg/m³ en el



trienio 2006 – 2008. Esta alza coincide con la flexibilización en el uso de combustible que experimentan las centrales termoeléctricas en Quillota producto del cambio de suministro de gas natural a petróleo diesel. Pese a ello no se observa superación de la norma horaria indicada en el DS 114 de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero sí se presentan valores cercanos al límite recomendado por la OMS, al menos en 2 estaciones, Bomberos y La Palma, ambas en Quillota, por lo que aplicando un criterio preventivo se puede estimar que las concentraciones horarias se acercan a valores riesgosos para la población aledaña, principalmente población de adultos mayores con afecciones respiratorias crónicas.

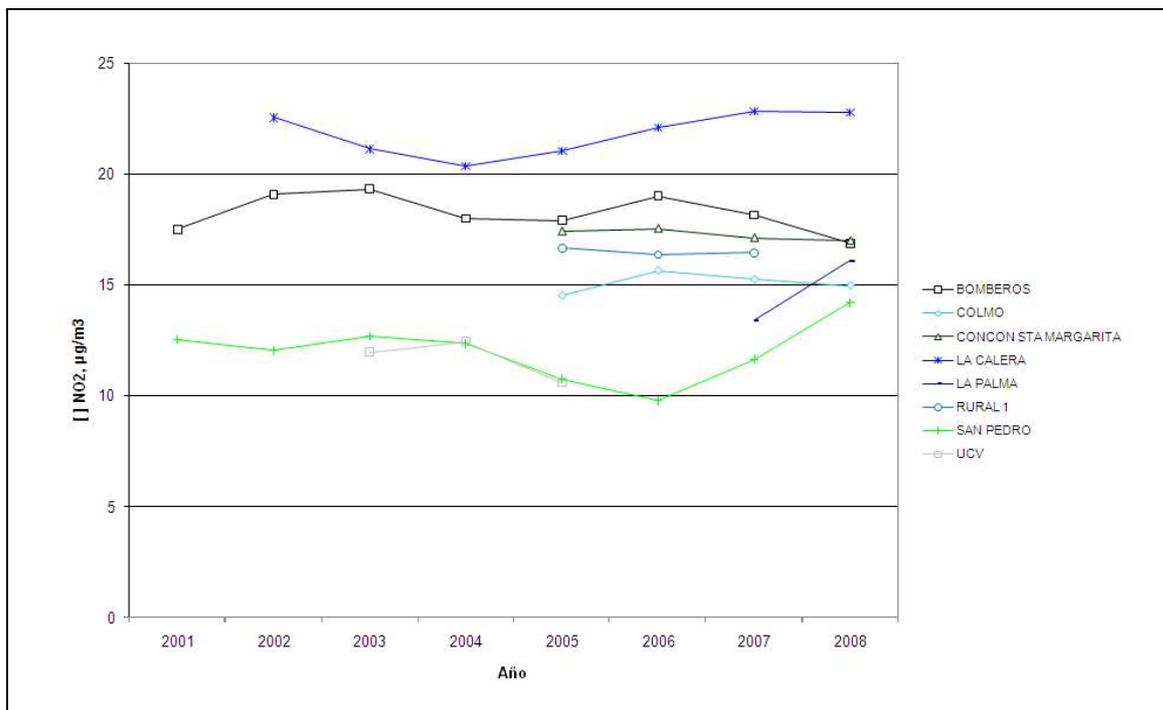


Figura 23. Concentración NO_2 trianual promedio para el período entre los años 2001 y 2008

En relación al límite secundario anual recomendado por la OMS de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, todas las estaciones monitoras presentan valores trianuales inferiores, por lo que el riesgo a la vegetación por exposiciones de largo plazo se puede estimar bajo. Sin perjuicio de ello cabe mencionar que tanto la vegetación nativa como los bosques presentan mayor sensibilidad al NO_2 que los cultivos (Delgado-Saborit, J.M., 2004). Si se toma en consideración que a exposiciones superiores a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se observan efectos en la actividad fotosintética de las plantas, los valores horarios obtenidos en la zona de Quillota, se acercan a niveles riesgosos para la vegetación.

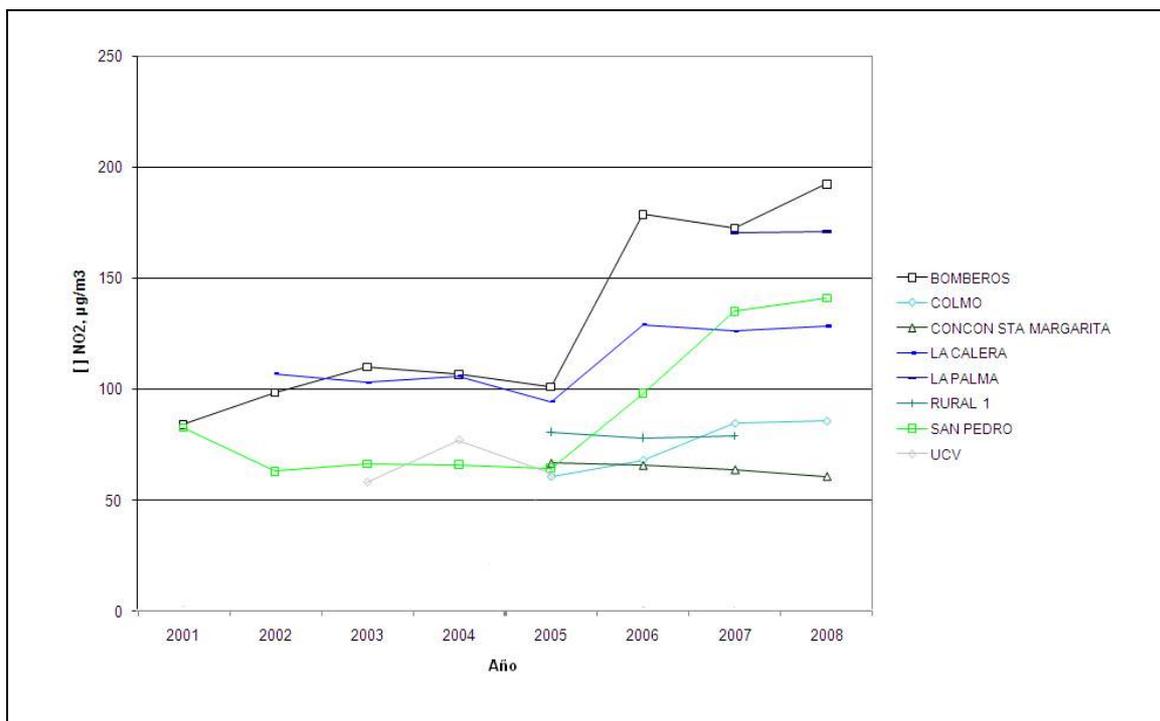


Figura 24. Concentración NO₂ promedio trianual del percentil 99 horario para el período entre los años 2001 y 2008

Al comparar los valores de concentración de 24 horas del año 2006 con el límite recomendado por la OMS de 75 µg/m³, se observa que entre los meses de mayo y julio, hay una superación de dicho valor en a lo menos una decena de ocasiones, principalmente en las estaciones Bomberos y La Calera, alcanzando valores de 119 µg/m³⁹(Figura 25), si esto se suma a la mayor toxicidad del NO₂ en condiciones invernales¹⁰, se puede establecer fundadamente una situación riesgosa por exposiciones de corto plazo para los cultivos de la zona, entre los que se encuentran paltos, limoneros y naranjos principalmente.

⁹ Dicho valor se obtuvo el día 30 de junio de 2006 en estación monitora Bomberos.

¹⁰ Las condiciones ambientales también influyen la respuesta de las plantas al NO₂, dado que la solubilidad de muchos gases, incluido el NO₂ es mayor a medida que disminuyen las temperaturas, mientras que la actividad metabólica de la planta y consecuentemente su capacidad de desintoxicarse, es menor. Esto hace que la toxicidad del NO₂ en condiciones invernales sea mayor que en condiciones estivales.

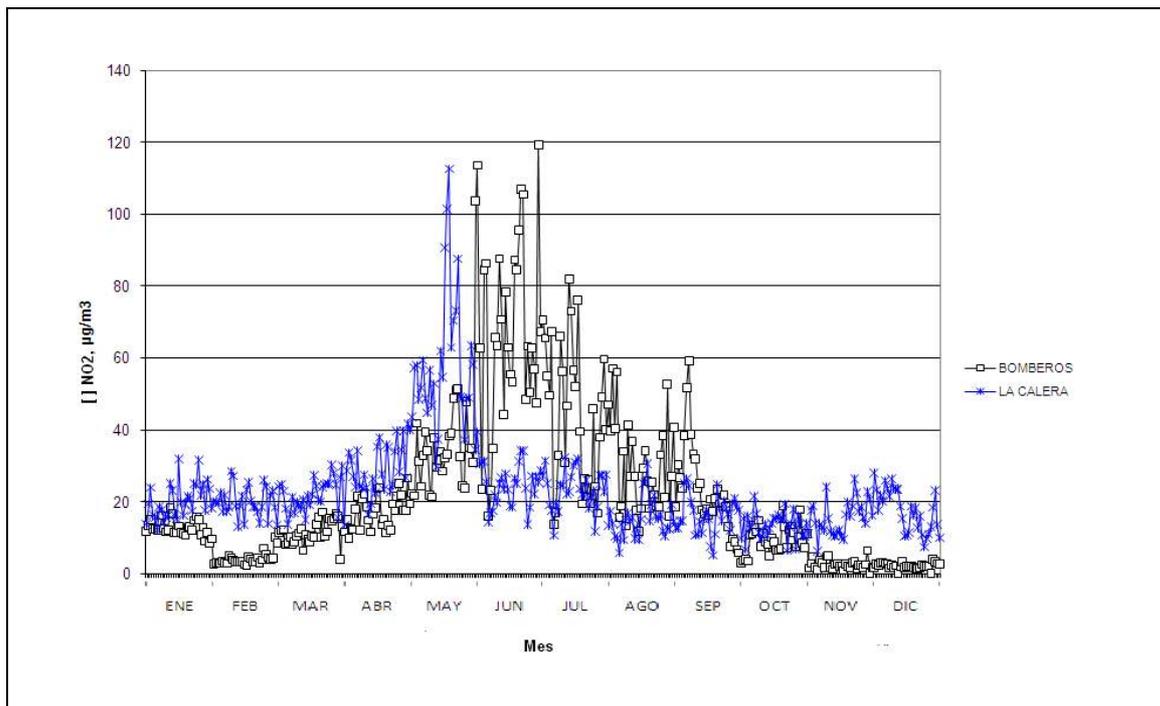


Figura 25. Concentración NO₂ promedios diarios para el año 2006.

5.2.2. Ozono, O₃

Las estaciones monitoras de calidad del aire, entre 1998 y 2008, muestran un patrón de la concentración de O₃ que varía durante el día. La Figura 26 muestra que durante la madrugada se presentan bajas concentraciones, que alcanzan sus mínimos entre las 07.00 h y 08.00 h y aumentos en directa relación con el aumento de la radiación solar, alcanzando sus valores máximos entre las 14.00 h y 16.00 h para luego disminuir conjuntamente con el decaimiento de la radiación solar. Durante la noche las concentraciones de O₃ continúan un descenso sostenido, pero más atenuado durante la madrugada para encontrar sus mínimos valores entre las 06.00 h y 08.00 h. Se observa en esta figura las estaciones monitoras cuyas mediciones, efectuadas en algunos tramos entre 1998-2008, registraron perfiles de concentraciones promedio significativas, tal es el caso de Cajón de San Pedro (1998-1999), Hijuelas (1999-2002), UCV (1999-2005), y Limache (1999-2000), que presentan sus máximas concentraciones horarias promedio a las 15.00 h con 67 (± 17) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 58 (± 30) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 54 (± 20) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 53 (± 18) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Cabe mencionar que ninguna de estas estaciones se encuentra operativa en la actualidad.

La Figura 27 se refiere a las mediciones de 2006, se observan en ella diferencias en las magnitudes y horarios de máxima concentración (peak) de O₃ para las diferentes estaciones. Al observar las variaciones horarias promedio del año 2006, los peak más altos se presentan en San Pedro, La Cruz y La Palma. En San Pedro se alcanza un promedio de 55 (± 19) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 16.00 h, en La Cruz de 49 (± 25) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15.00 h. y en La Palma de 49 (± 23) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 15.00 h.



Las diferencias de magnitud de las concentraciones se pueden explicar por diversos factores, entre ellos la presencia de gases precursores y la radiación solar. La influencia de este último factor se puede observar en la Figura 28, donde las concentraciones horarias promedio para el mes de enero de 2006 son bastante mayores a las obtenidas en el mes de julio. Por ejemplo San Pedro presenta promedios máximos de $63 (\pm 18) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14.00 h en enero y de $42 (\pm 19) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 17.00 h en julio, siendo el caso de La Palma aún más radical, pues mientras presenta un promedio máximo de $61 (\pm 12)$ a las 20.00 h en enero, en julio su promedio máximo desciende a $20 (\pm 20)$ a las 17.00 h. También se observa que las concentraciones de O_3 coinciden con la extensión de las horas de exposición solar en invierno y verano. La diferencia en las horas donde se dan los valores más altos, puede explicarse también por la localización de las estaciones monitoras y su relación con la exposición solar. Mientras La Calera, Rural 1 y La Cruz se localizan en zonas más encajonadas las estaciones localizadas en Quillota y Concón se localizan en zonas flanqueadas por un relieve menos pronunciado y un valle más ancho. En el caso de La Palma las altas concentraciones observadas en su perfil hacia las 20.00 h, puede deberse a su localización hacia el extremo Este del valle y al encajonamiento existente inmediatamente al Norte que favorecería su acumulación.

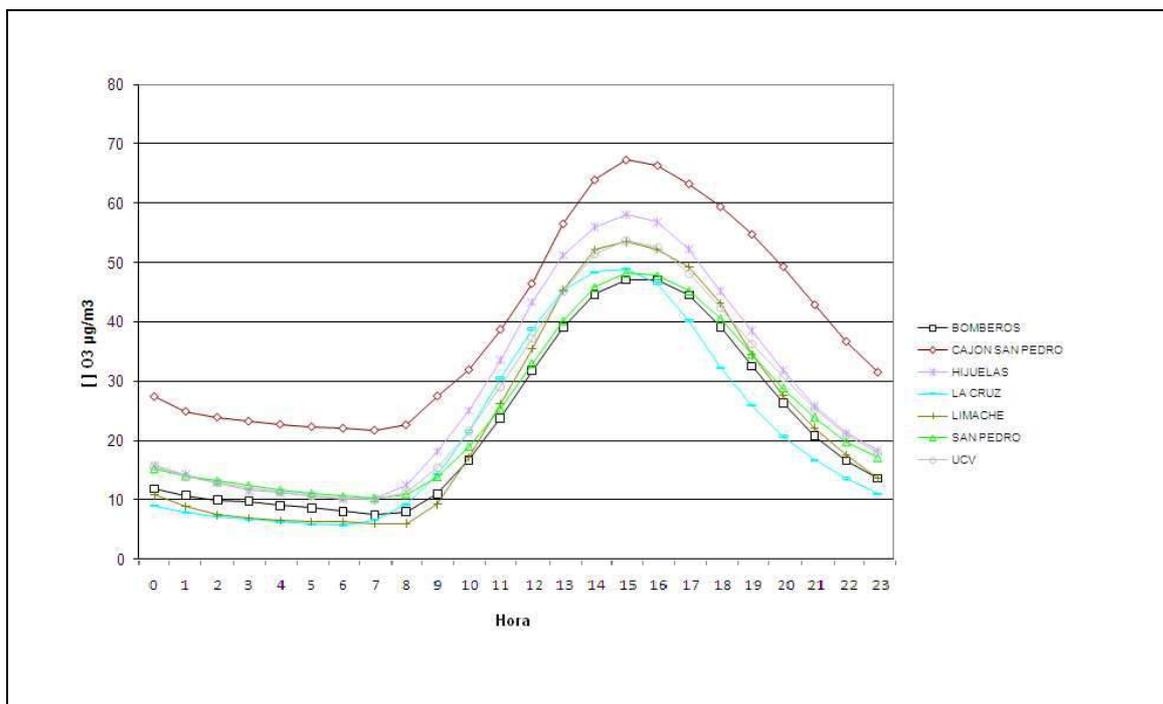


Figura 26. Ciclo diario de la concentración de O_3 horaria promedio para el período comprendido entre los años 1998 – 2008.

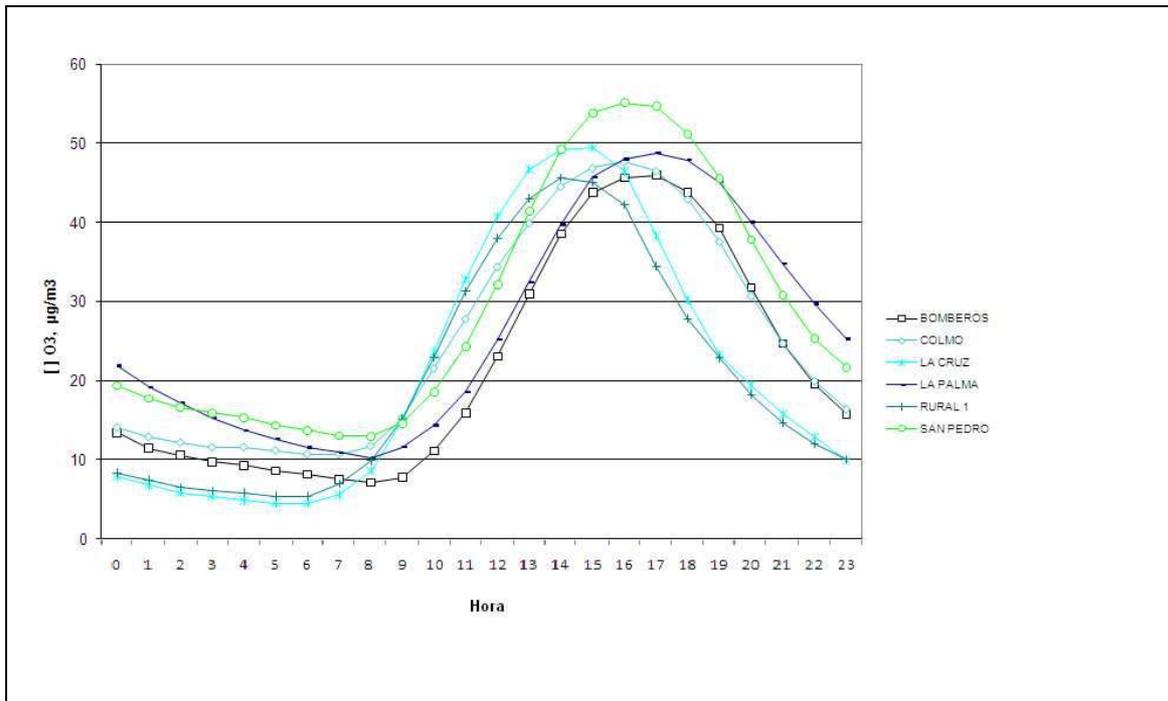


Figura 27. Ciclo diario de la concentración de O₃ horaria promedio para el año 2006.

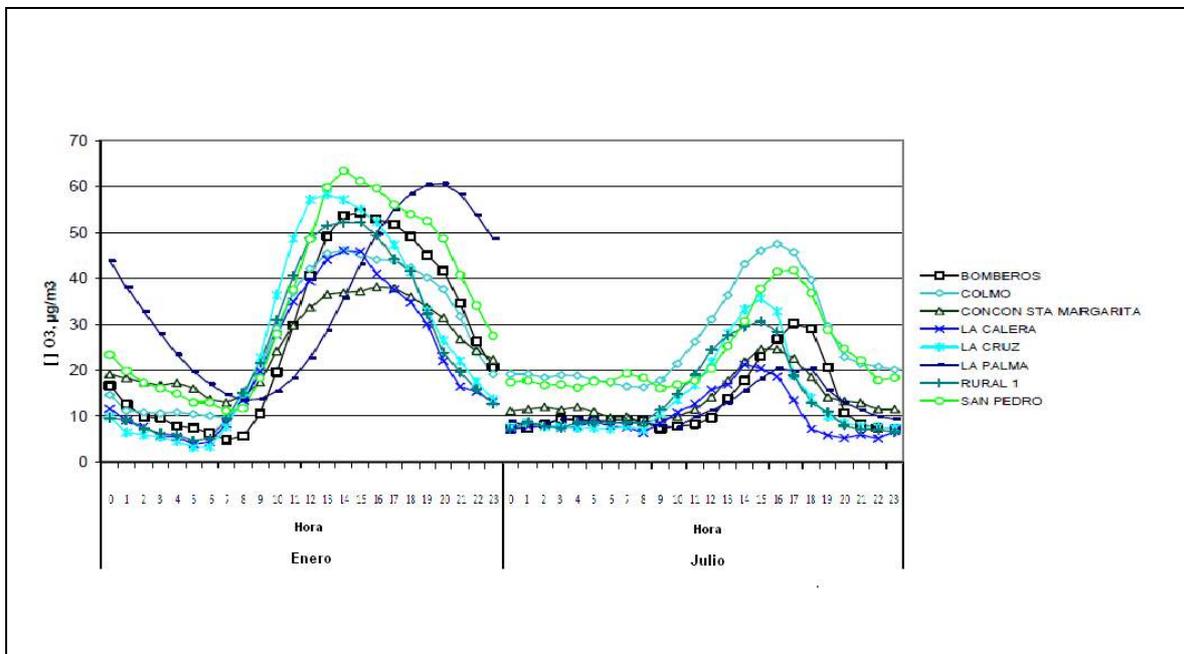


Figura 28. Ciclo diario de la concentración de O₃ horaria promedio para los meses de enero y julio del año 2006.



La incidencia de los gases precursores en las concentraciones de O_3 , se puede observar del análisis de las curvas de comportamiento horario promedio de las concentraciones tanto de NO_2 como de HCT. La Figura 29 muestra las concentraciones promedio horarias de O_3 , NO y NO_2 para el mes de enero de 2006, donde se aprecia la relación inversa entre las concentraciones de NO_2 y O_3 durante las horas de exposición solar, situación manifiesta en todas las estaciones salvo en la estación monitora La Calera presumiblemente por la menor presencia de COVs y/o por cumplir la fuente cementera la función de sumidero de O_3 .

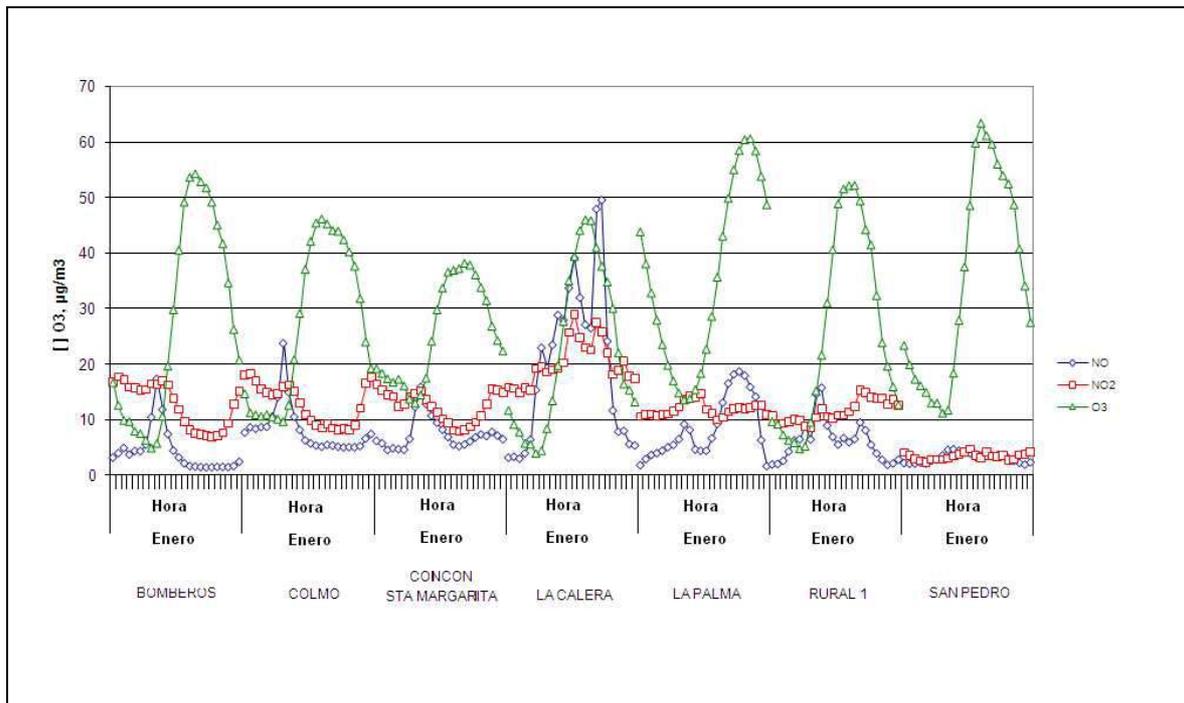


Figura 29. Ciclos diarios de la concentración de O_3 , NO y NO_2 horaria promedio para el mes de enero de 2006.

Respecto a la presencia de COVs, reflejada a través de las concentraciones de HCT disponibles para el año 2006, se observa que las estaciones monitoras San Pedro y La Palma junto con ser las de mayores concentraciones de O_3 , con $63 (\pm 18) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14.00 y $61 (\pm 12) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 20.00 h, presentan perfil de concentraciones altas y estables de HCT con leve disminución durante la tarde (Figura 30). Cabe indicar que en todas las estaciones se observa una disminución de los HCT durante la tarde, atribuible a su consumo por parte de los óxidos de nitrógeno, lo cual favorecería el aumento de O_3 , y explicaría la notable diferencia de magnitud entre las concentraciones de O_3 y óxidos de nitrógeno, por ejemplo, en San Pedro y La Palma. La acumulación se podría deber a las características geográficas de la zona, encajonada vientos



arriba de fuentes precursoras, como así también a la falta de un sumidero de O_3 en estas zonas rurales, generando un nivel de base de este gas. La ausencia de fuentes de óxidos de nitrógeno en las zonas rurales no industriales podría explicar las altas concentraciones de O_3 observadas en La Palma, San Pedro y Rural, en comparación con La Calera y Concón. Respecto a las fuentes de COVs consumidoras de NO_x en la zona, éstas pueden ser antropogénicas, biogénicas o mixtas. Sin embargo, no se dispone de mayor información acerca del origen de los COVs, salvo la información relativa a emisiones antropogénicas relativamente significativas principalmente en la zona de Concón y Quillota.

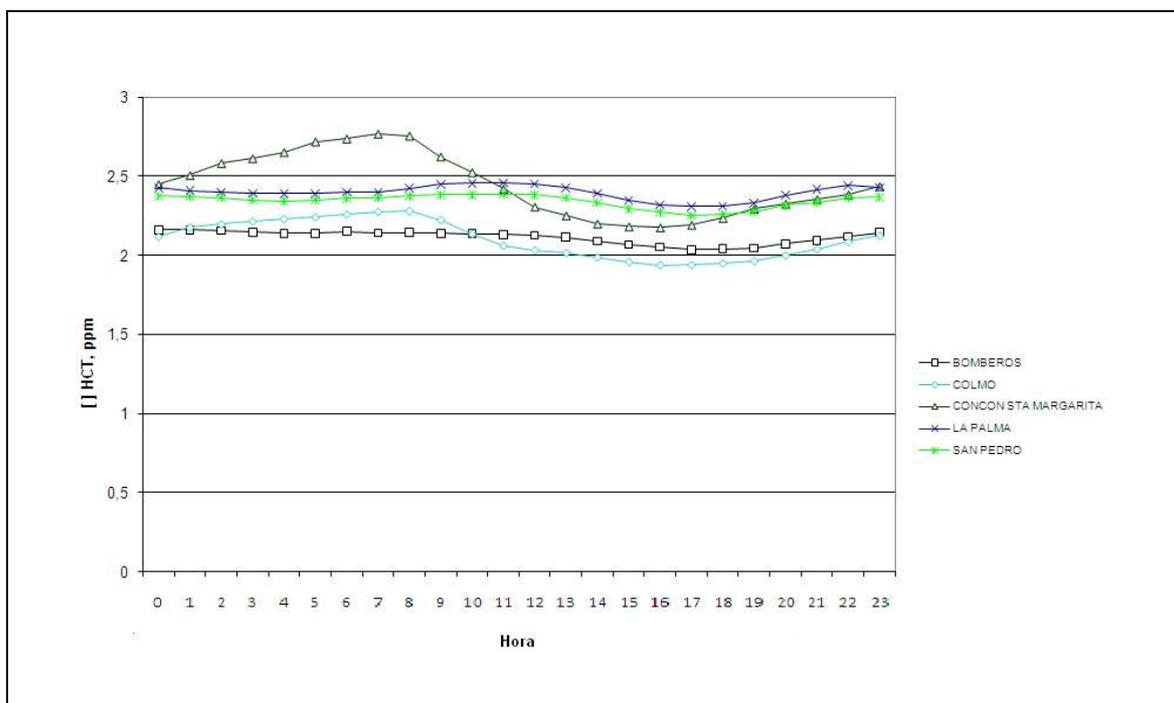


Figura 30. Ciclo diario de la concentración de HCT horaria promedio para el año 2006.

El Cuadro 13, muestra que los resultados del análisis PCA aplicado en la estación Concón Santa Margarita, indican tres factores que explican un 67% de la varianza total. El primero explica el 40% de la varianza total y muestra la asociación entre HCT, HCNM y NO , dando cuenta de la presencia de una fuente común para estas especies, probablemente originados en la quema de combustibles fósiles. Un segundo factor explica un 17% de la varianza total y muestra la asociación entre la radiación solar (RAD), la velocidad del viento (VIENTO) y el NO_2 . Este factor puede denotar la presencia de factores ambientales que inciden en las reacciones fotoquímicas. Un tercer factor, responsable del 10% de la varianza total, indica la formación de O_3 como un clásico contaminante secundario.



Cuadro 13. Resultados análisis estadístico PCA,
Estación Concón urbana fija – Santa Margarita.

Matriz de Componentes Principales, Rotación VARIMAX			
	Componentes		
	1	2	3
HCT	0,888	-0,227	-0,175
HCNM	0,891	-0,197	-0,051
NO2	0,122	-0,608	-0,05
NO	0,671	0,033	-0,154
O3	-0,184	-0,016	0,955
VIENTO	0,043	0,813	0,063
TEMP	-0,462	0,518	0,421
RAD	-0,218	0,854	-0,097
DIREC	-0,446	0,453	-0,004
Autovalores	3,632	1,522	,875
% de la varianza	40,357	16,916	9,720
Acumulado %	40,357	57,273	66,993

La Figura 31 muestra las concentraciones trianuales promedio del percentil 99 para 8 horas de O₃ donde no se evidencian niveles superiores a los normados en el DS 112 de 120 µg/m³, como tampoco del límite recomendado por la OMS de 100 µg/m³. No obstante, para el período 2004 – 2006, en las estaciones de monitoreo San Pedro¹¹ y La Cruz se registran concentraciones trianuales de O₃ cercanas a la latencia con 93 µg/m³ y 92 µg/m³ respectivamente, para luego tender a disminuir en los trienios subsiguientes. La tendencia a la disminución se observa también en Bomberos, Rural 1 y La Palma; por el contrario, se observan tendencias al aumento en Concón y Colmo. Atendidas las altas concentraciones observadas en San Pedro, La Palma y La Cruz y la tendencia al alza en Colmo, se puede estimar la presencia de una situación riesgosa para la salud de la población de la zona aledaña a dichas estaciones, toda vez que estudios de series cronológicas indican un aumento de la mortalidad diaria del orden de 0,3-0,5% por cada incremento de 10 µg/m³ de la concentración de 8 horas, por encima de un nivel de referencia estimado de 70 µg/m³ (OMS, 2006).

¹¹ San Pedro precedida de una sostenida tendencia al alza desde el trienio 1999 – 2001.

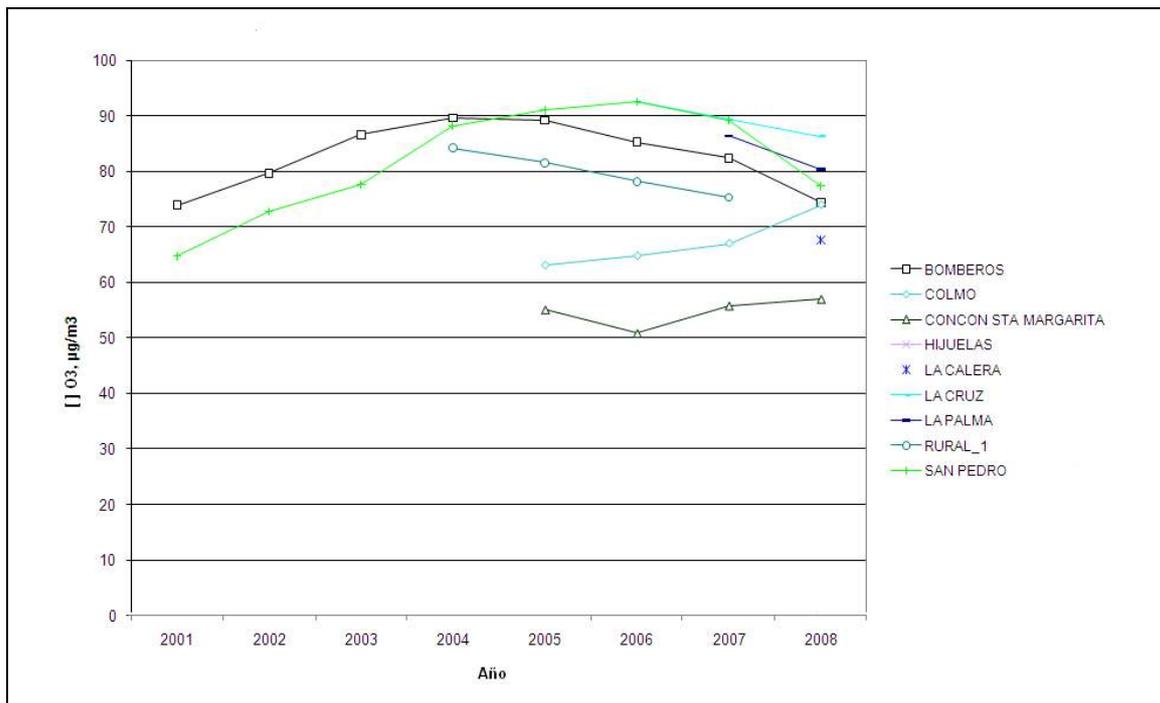


Figura 31. Concentración O₃ promedio trianual del percentil 99 de 8 horas para el período entre los años 2001 y 2008.

Al evaluar los resultados de las concentraciones horarias de O₃, con el valor de referencia secundario de la OMS, AOT40¹² para 5 días, límite sobre el cual existe riesgo de daño visible en los cultivos, se observa que en distintos momentos de los 10 años de mediciones considerados en este estudio, han existido ocasiones en que se ha superado la recomendación relativa a aire húmedo de 400 µg/m³-h en las estaciones Hijueltas, UCV - La Palma, San Pedro y La Cruz registrándose en esta estación en abril de 2006 la última superación del valor recomendado por la OMS, donde alcanzó 510 µg/m³-h el 17.04.2006. Previamente se superó en San Pedro a finales de 2005, alcanzando 803 µg/m³-h el 10.12.2005 (Figura 32). Se observa además que Hijueltas superó en los meses de enero y febrero de 2000 el límite relativo a aire seco de 1000 µg/m³-h alcanzando 4451 µg/m³-h el 26.01.2000. De acuerdo a lo anterior se presenta una situación riesgosa por exposiciones de corto plazo para los cultivos de la zona en los que se cuentan principalmente paltos, limoneros y naranjos, pudiéndose esperar efectos en el follaje de dichos cultivos.

Las concentraciones horarias de O₃ comparadas con la referencia de calidad secundaria AOT40 para 3 meses, muestra que existió una clara superación en Hijueltas en 2000 donde la concentración llegó a un nivel superior a los 6000 µg/m³-h durante el primer semestre de 2000, alcanzando en 11.04.2000 un valor de 18179 µg/m³-h. A partir de esta fecha no se observa

¹² Corresponde a la suma de la diferencia entre las concentraciones de 1 hora donde se supera el umbral de 40 ppb (80 µg/m³) y este valor.



superación del límite de la OMS. Solo se observa una alza en por debajo del valor recomendado en San Pedro hacia finales de 2005 e inicio de 2006 alcanzando su valor más alto de $3534 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{-h}$ el 18.12.2005 (Figura 33). Se observa cierta relación entre las concentraciones de O_3 medidas en San Pedro con La Palma y Bomberos.

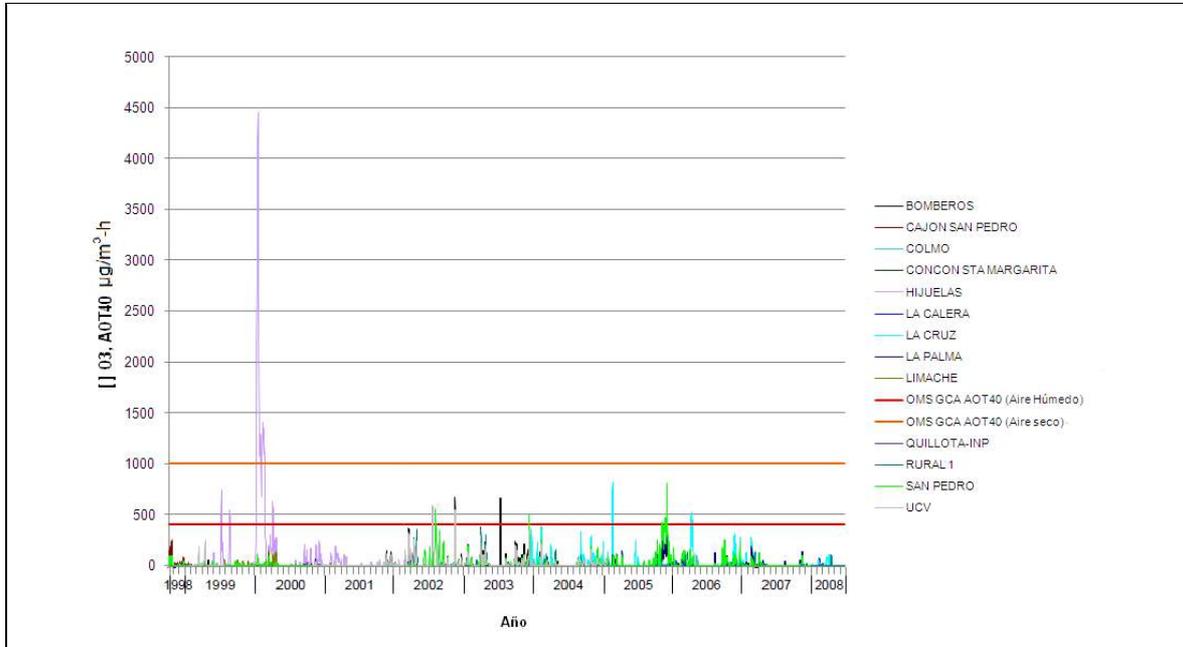


Figura 32. Concentración O_3 del indicador AOT40 – 5 días para el período entre 1998 y 2008.

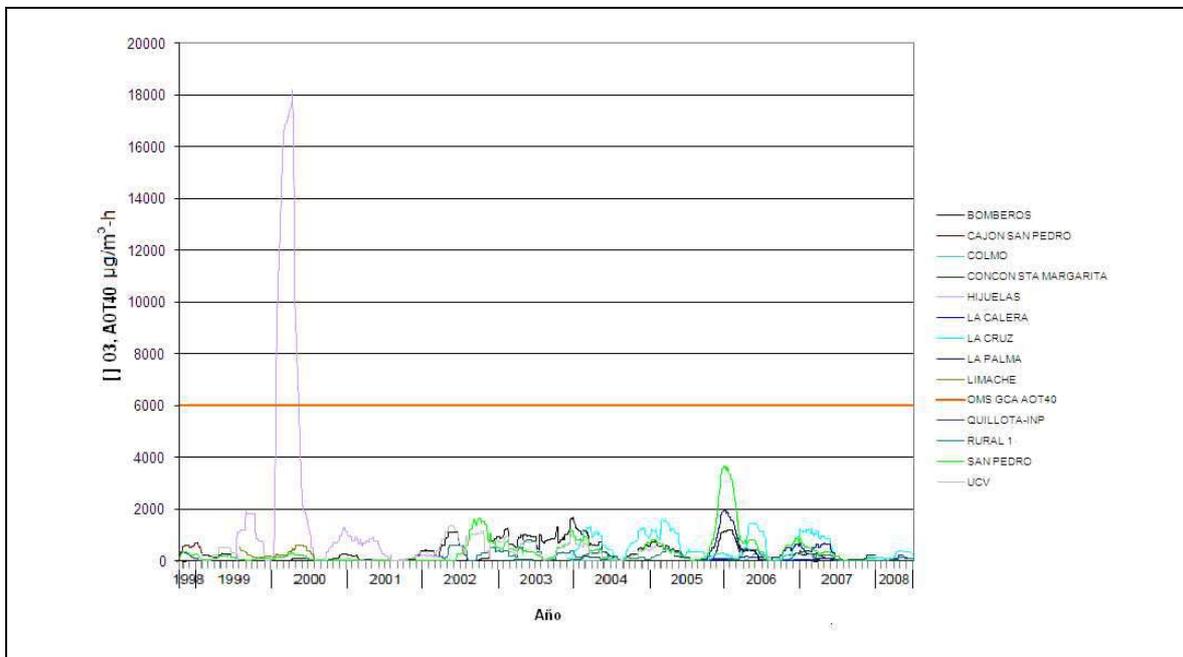


Figura 33. Concentración O_3 del indicador AOT40 – 3 meses para el período entre 1998 y 2008.



Respecto a los efectos crónicos sobre los bosques, no se observan excedencias al valor de referencia de la OMS (AOT40 - 6 meses), (Figura 34).

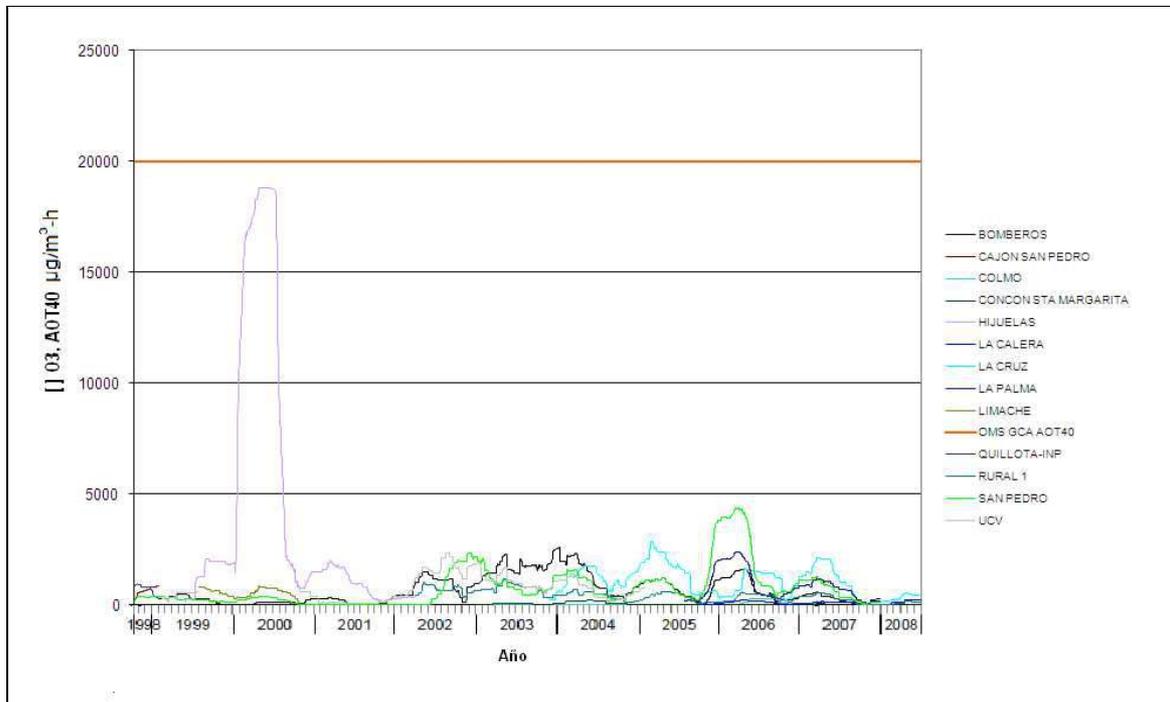


Figura 34. Concentración O₃ del indicador AOT40 – 6 meses para el período entre 1998 y 2008.

5.2.3. Dióxido de azufre, SO₂

Las estaciones monitoras de calidad del aire, entre 1998 y 2008, muestran un patrón general de comportamiento de las concentraciones horarias promedio de SO₂ que varía durante el día. Desde la media noche hasta las primeras horas de la mañana se observan bajas concentraciones de SO₂, posiblemente debido a la transformación a H₂SO₄. El avance de la mañana, el aumento de la radiación solar y la disminución de la humedad relativa, favorece el aumento de las concentraciones de SO₂ hasta valores máximos al medio día y una disminución posterior debido al incremento sostenido de la intensidad del viento, de dirección Oeste hasta el ocaso del día, donde se comienzan a manifestar flujos inversos de menor intensidad.

Durante la noche, el descenso de la temperatura y el incremento de la HR, hacen disminuir las concentraciones de SO₂ a valores mínimos entre las 00.00 h hasta las 07.00 h. Sin perjuicio de este patrón general, en Santa Margarita (Chagres) y en la estación Concón Santa Margarita se observan patrones particulares y diferenciados. En la primera tras mantenerse en notable descenso durante la noche y concentraciones bajas durante la madrugada, solo incrementadas hacia el medio día seguido de un leve descenso, se produce un incremento en el



promedio de las concentraciones a partir de las 14.00 h ascendiendo desde los $61 (\pm 82) \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta un promedio de $141 (\pm 128) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 19.00 h para luego descender bruscamente. Por su parte en Concón en la estación Santa Margarita, se observa durante la madrugada y hasta las primeras horas de la mañana una curva inversa al resto de las estaciones monitoras, dado que las concentraciones ascienden estabilizándose en torno a los $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por ejemplo a las 09.00 h se tiene en promedio una concentración de $61 (\pm 92) \mu\text{g}/\text{m}^3$, concentraciones que posteriormente descienden siendo bajas entre las 13.00 h y 20.00 h situándose por ejemplo a las 17.00 h en $13 (\pm 24) \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 35).

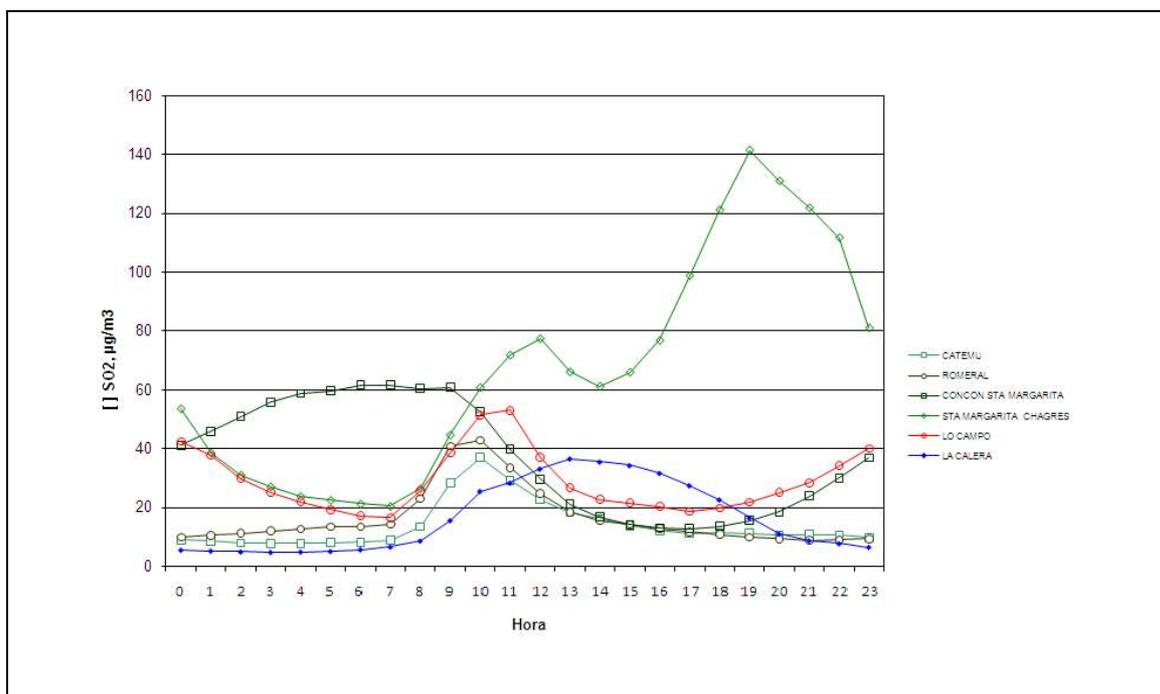


Figura 35. Ciclo diario de la concentración de SO_2 horaria promedio para el período entre los años 1998 y 2008.

La Figura 36 muestra que el comportamiento diario de las concentraciones de SO_2 para el año 2006, es similar al patrón descrito para la Figura 35. Las concentraciones de mayor magnitud se producen en Santa Margarita (Chagres) y Concón, sectores cercanos a dos importantes fuentes de SO_2 como es el caso de la Fundición Chagres y Enap respectivamente. El resto de las estaciones no superan los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en sus horas peak.

Santa Margarita (Chagres) a diferencia del resto de las estaciones, presenta incrementos en las concentraciones a partir de las primeras horas de la tarde, alcanzando valores peak entre las 19.00 h y 21.00 h con promedios de $111 (\pm 99) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $109 (\pm 119) \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Este comportamiento puede ser explicado por factores tales como el incremento de la radiación



solar de primeras horas de la tarde, el descenso de la humedad, su localización flanqueada por las cuencas de Aconcagua y Catemu, así como también por el descenso en la intensidad del viento hacia el ocaso de la tarde y la barrera orográfica presente en dicho sector que impide la dispersión de los gases, facilitándose así la acumulación de SO_2 .

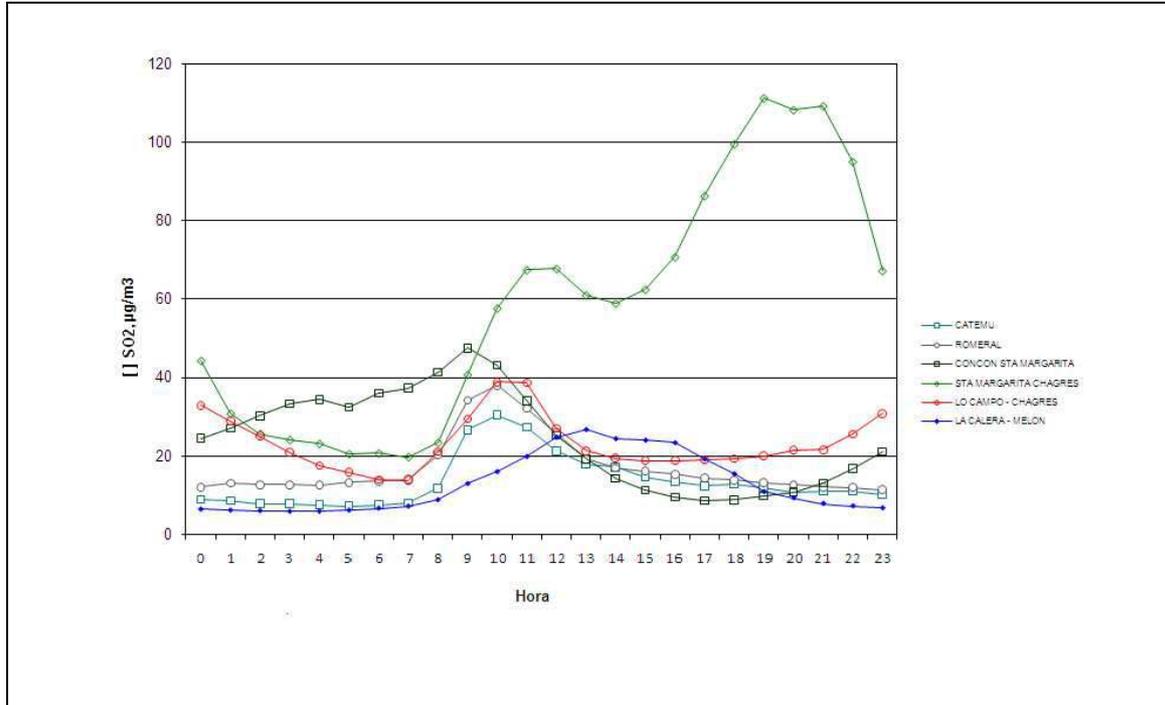


Figura 36. Ciclo diario de la concentración de SO_2 horaria promedio para el año 2006.

Dicho comportamiento se presenta con diferente magnitud durante las estaciones del año, tal como se muestra en la Figura 37, donde las concentraciones son más altas en verano, con valores promedio cercanos a los $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en su horario peak, ello pese a una mejor ventilación; por ejemplo en enero a las 22.00 h se observa un promedio de $299 (\pm 205) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo anterior permite suponer que junto a las condiciones orográficas, la menor humedad relativa tiene un rol importante en la acumulación de SO_2 en el sector de Santa Margarita donde existiría una probabilidad cierta de suscitarse episodios de altas concentraciones en verano más que en invierno, con el consiguiente riesgo para la salud de la población sensible, tales como personas con asma y adultos mayores con afecciones respiratorias, quienes podrían padecer afecciones pulmonares y síntomas respiratorios frente a exposiciones de corto plazo (10 minutos) a concentraciones superiores a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Un ejemplo es enero de 2006 donde se alcanzó un valor promedio horario de $861 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo a dichas concentraciones podría esperarse efectos agudos en los cultivos, no obstante se observan valores inferiores al límite secundario de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



En Concón se observa que durante la noche el SO_2 presente en la zona, se desplaza al O por vientos E, hacia la zona urbana de Concón aledaña a la refinería ENAP, incrementándose sostenidamente la concentración de SO_2 hasta las primeras horas de la mañana, cuando el incremento de la radiación solar y de la intensidad del viento, junto al cambio de dirección inciden en la disminución del SO_2 hasta sus niveles más bajos entrada la tarde, es así como a las 17.00 h se observa un promedio de $9 (\pm 11) \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 36). Esto se revierte sólo al caer la noche debido al debilitamiento de la intensidad del viento y posterior inversión de la orientación del flujo. Las diferencias de intensidad del viento entre los meses cálidos y fríos, puede explicar las diferencias en las concentraciones entre enero y abril de 2006, donde se observan en horas de mayor concentración como es las 09.00 h valores promedio de $39 (\pm 36) \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $55 (\pm 56) \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (Figura 37). Sin embargo, la atmósfera húmeda de la costa actúa como regulador de las concentraciones en los meses fríos evitando que se eleven ostensiblemente durante la mañana. En invierno se producen precipitaciones que remueven mecánicamente el SO_2 o su secundario H_2SO_4 o sulfatos disminuyendo su concentración, lo cual explicaría las bajas concentraciones promedio en julio, donde a las 09.00 h se tiene $31 (\pm 38) \mu\text{g}/\text{m}^3$. A su vez las altas concentraciones observadas durante la madrugada y mañana en el mes de octubre, como por ejemplo $66 (\pm 69) \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 08.00 h puede deberse a que aún persisten temperaturas promedio bajas en dicha época del año propiciando una mala ventilación matinal. La tendencia a la acumulación de SO_2 durante la madrugada y mañana en Concón, principalmente en los meses fríos, indica que en esta zona existe un riesgo potencial de que se susciten episodios de altas concentraciones y lluvia ácida que es de esperar por la presencia de bastante aerosol marino (NaCl).

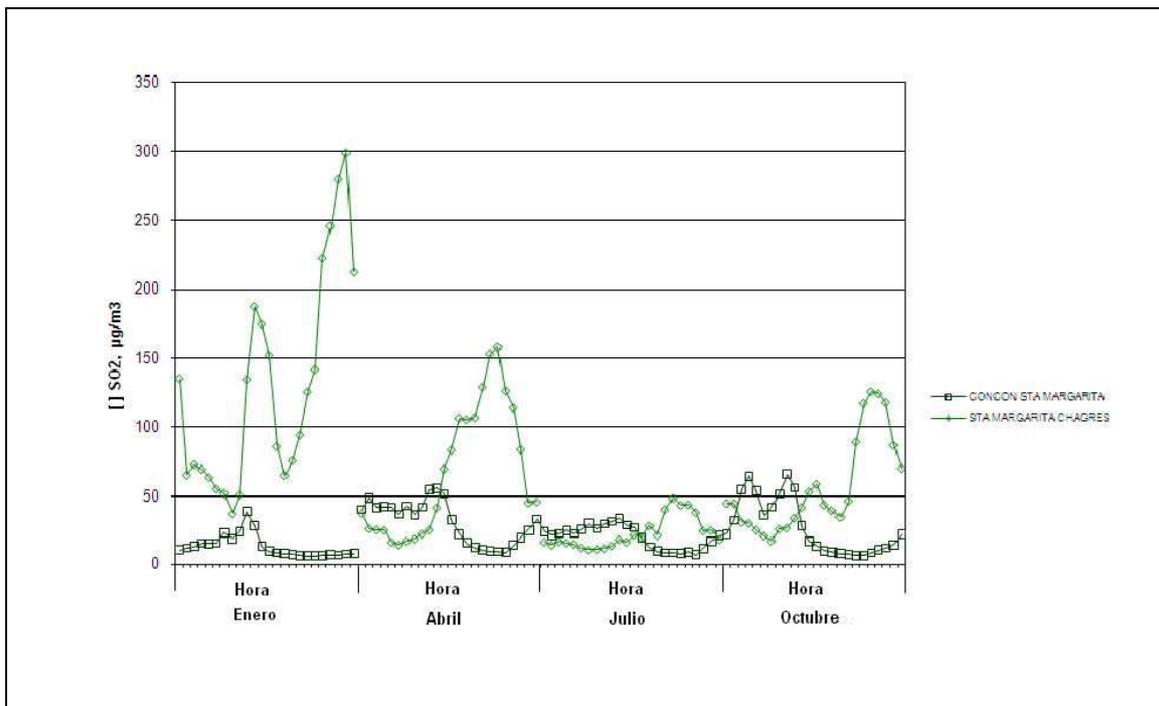


Figura 37. Ciclo diario de la concentración de SO_2 horaria promedio para los meses de enero, abril, julio y octubre del año 2006.

Se observa además que la curva de comportamiento promedio mensual oscila de acuerdo a las estaciones del año, donde en los meses cálidos se observa concentraciones más elevadas que en los meses fríos. Las series de tiempo de los promedios mensuales de la concentración de SO_2 , confirman que los mayores valores se aprecian en la estación Santa Margarita (Chagres) tal como se observa en la Figura 38. Luego de presentar sus valores más elevados durante los meses cálidos de 2001-2002 con concentraciones que alcanzaron por ejemplo, en diciembre de 2001 un promedio de $143 (\pm 45) \mu\text{g}/\text{m}^3$, manifiesta una tendencia decreciente durante 2003 y 2004 que se revierte luego en 2005 para tender a disminuir durante 2007. Concón muestra una tendencia descendente desde el año 2000 donde en el mes de julio se registró un promedio $144 (\pm 97) \mu\text{g}/\text{m}^3$, llegando en el mes de junio de 2006 a registrar $39 (\pm 26) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Posteriormente, experimenta un incremento alcanzando en septiembre de 2007 un promedio de $57 (\pm 60) \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se desprende de la observación de la gráfica descrita que las concentraciones promedio más elevadas en Concón se presentan en la estación fría, a diferencia de Chagres donde se presentan en verano.

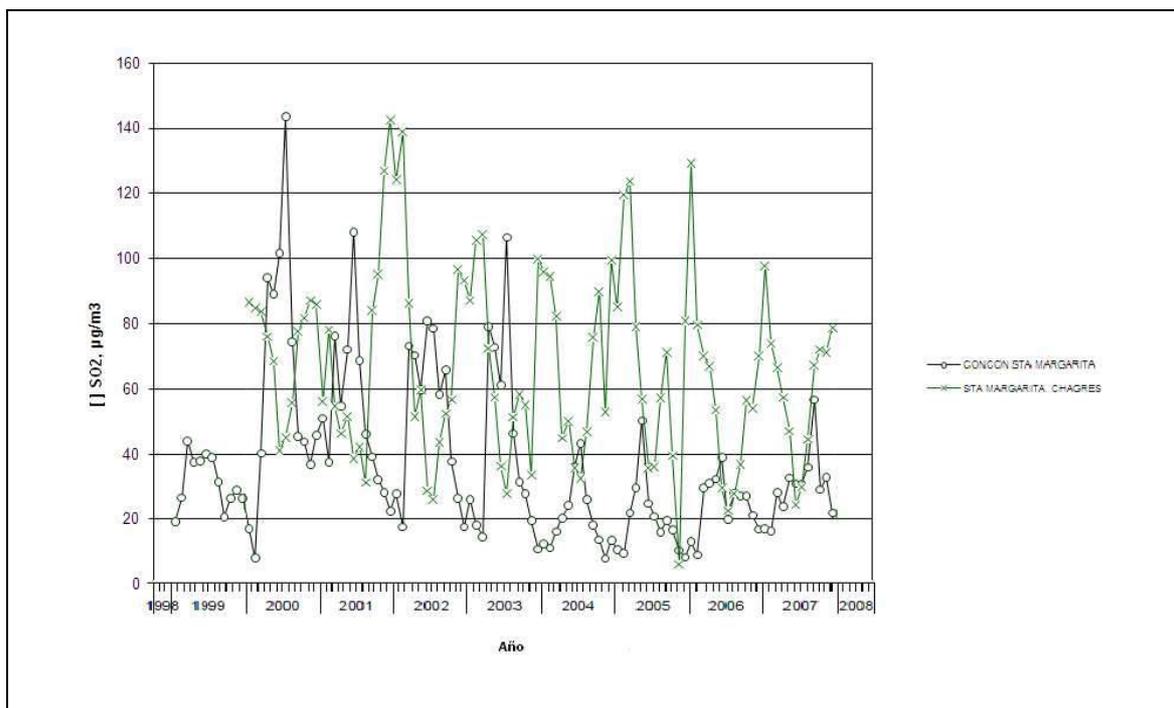


Figura 38. Ciclos anuales de la concentración de SO_2 mensual promedio para el período entre los años 1998 y 2008.

En los promedios trianuales mostrados en la Figura 39 las concentraciones anuales de SO_2 en todas las estaciones de los años analizados, presentan valores inferiores al límite normado por el DS 113/02 de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Los promedios trianuales del percentil 99 diario, muestran que no existen valores superiores a los normados por el DS 113/02 de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 40). Sin embargo, al considerar los valores de referencia de OMS, Santa Margarita Chagres se encuentra por sobre los $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que dicho organismo establece como meta objetivo 1. Desde un enfoque de riesgo, se presume riesgo potencial en Santa Margarita, mientras que en Concón si bien se observaron valores de latencia de la norma primaria diaria durante la primera mitad de la década, posteriormente se observa una notoria tendencia a la baja.

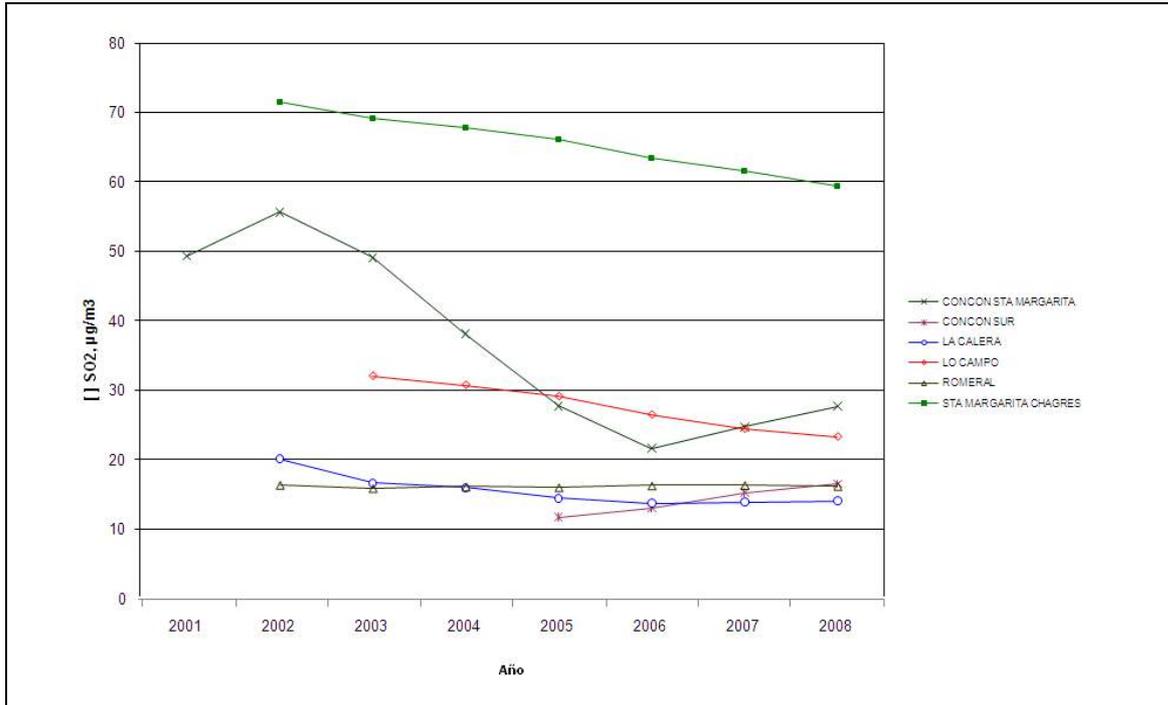


Figura 39. Concentración SO₂ trianual promedio para el período entre los años 2001 y 2008.

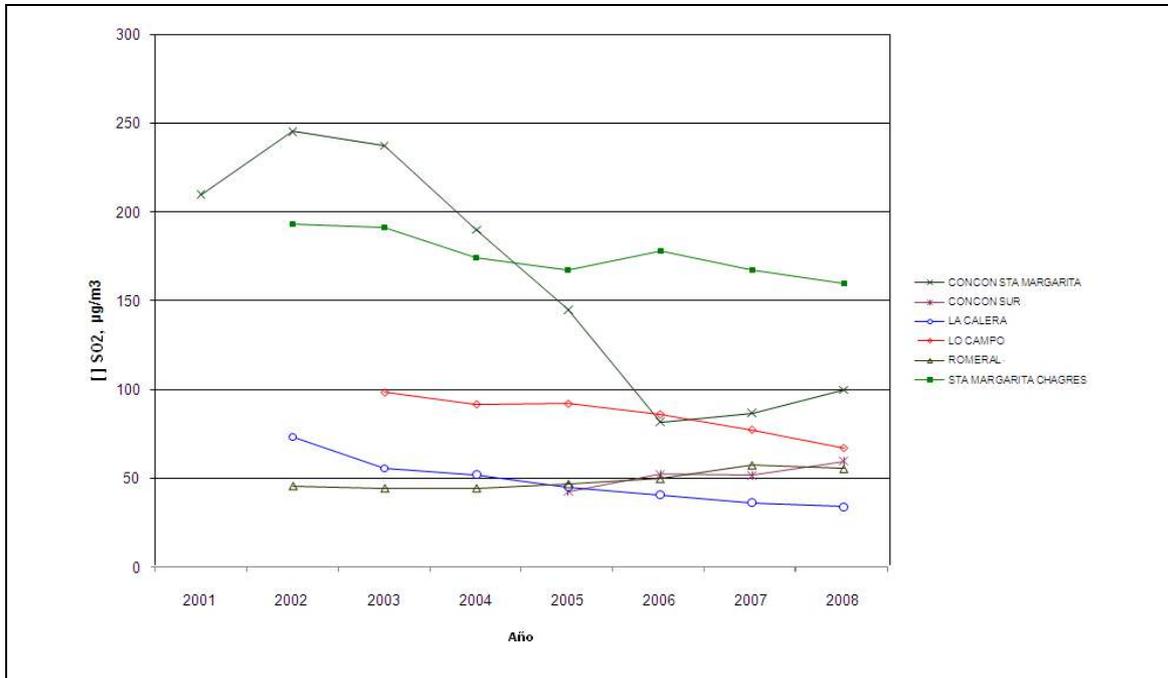


Figura 40. Concentración SO₂ promedio trianual del percentil 99 diario para el período entre los años 2001 y 2008.



Al comparar los valores máximos de concentración diaria con el valor de la norma secundaria de SO_2 , se observa sólo en 2003 un valor igual a los $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 41).

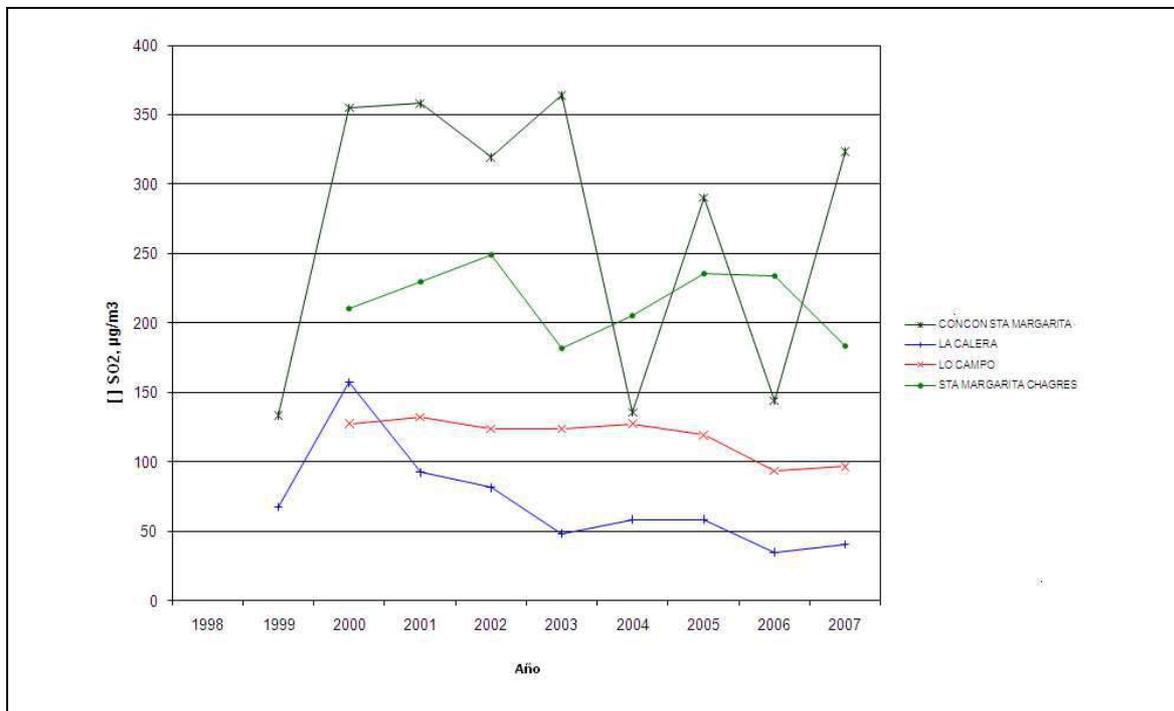


Figura 41. Concentración SO_2 de los máximos promedios diarios para el período entre 1998 y 2007.

Respecto a eventos de superación del límite de 1 hora para SO_2 ($1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se observa que la estación que presenta el mayor número de excedencias es Concón, con las últimas en el año 2007 (Figura 42).

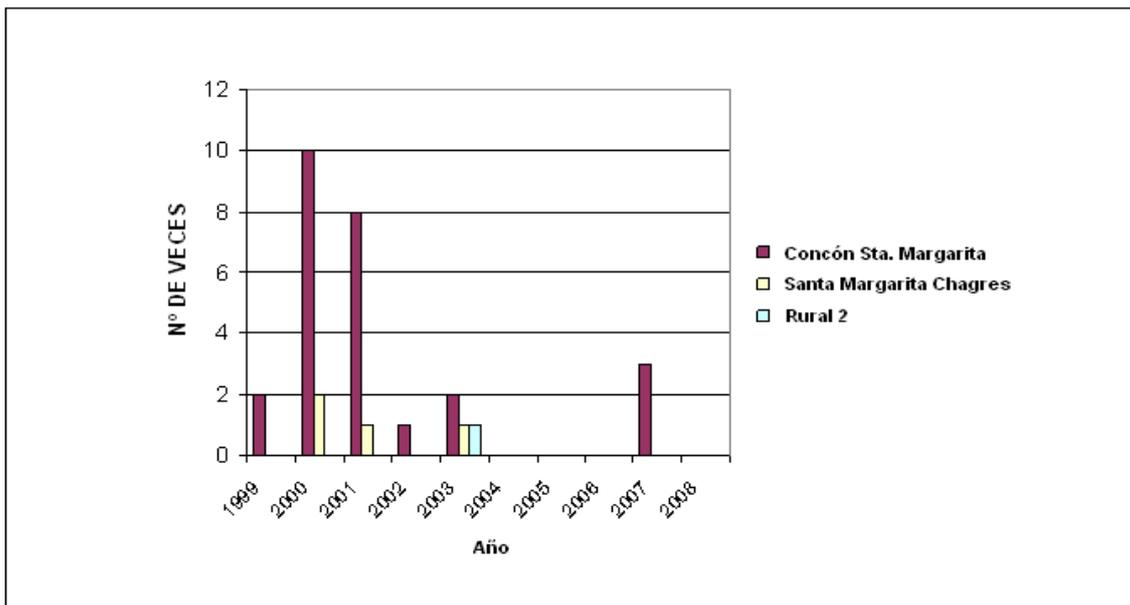


Figura 42. Número de eventos de superación del promedio horario límite para la norma secundaria de SO_2 de $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el período entre 1999 y 2008.

Al comparar los promedios anuales de SO_2 con la referencia de la OMS para los cultivos ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y para el recurso forestal ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se tiene que Santa Margarita, supera ambos valores durante todo el período en estudio. A su vez, Lo Campo y Concón superan principalmente el valor de referencia para la protección del recurso forestal. Lo anterior indica que existe riesgo para los cultivos y recurso forestal en Santa Margarita y Concón, no obstante que esta última es representativa de una zona urbana. Cabe mencionar que en la zona de Catemu y Panquehue predominan los paltos, vides, cítricos, nogales y olivos los cuales podrían evidenciar efectos crónicos tales como clorosis por acumulación de azufre en las hojas.

5.2.4. Material particulado, MP_{10}

Las concentraciones de MP_{10} entre 1998 y 2008, presentan un patrón estacional. En los meses cálidos el incremento de la radiación, temperatura y ventilación, favorecen la dispersión haciendo disminuir las concentraciones de MP_{10} . En los meses fríos las concentraciones se incrementan, producto del empeoramiento de las condiciones de ventilación de la cuenca y el aumento de las emisiones por las bajas temperaturas que propician la combustión de leña para calefacción, como también agrícola, para el control de las heladas. Las precipitaciones, principalmente en invierno, remueven al menos parcialmente las partículas. Por otra parte, el efecto puntual de los incendios forestales con mayor frecuencia en los meses de verano, y actividades



puntuales de remoción de material y trabajos en talleres cerca de las estaciones de monitoreo¹³ incrementa las concentraciones.

El patrón estacional de las concentraciones de MP_{10} se evidencia con mayor claridad en las redes Chagres y Nehuenco – San Isidro (figuras 43 y 44).

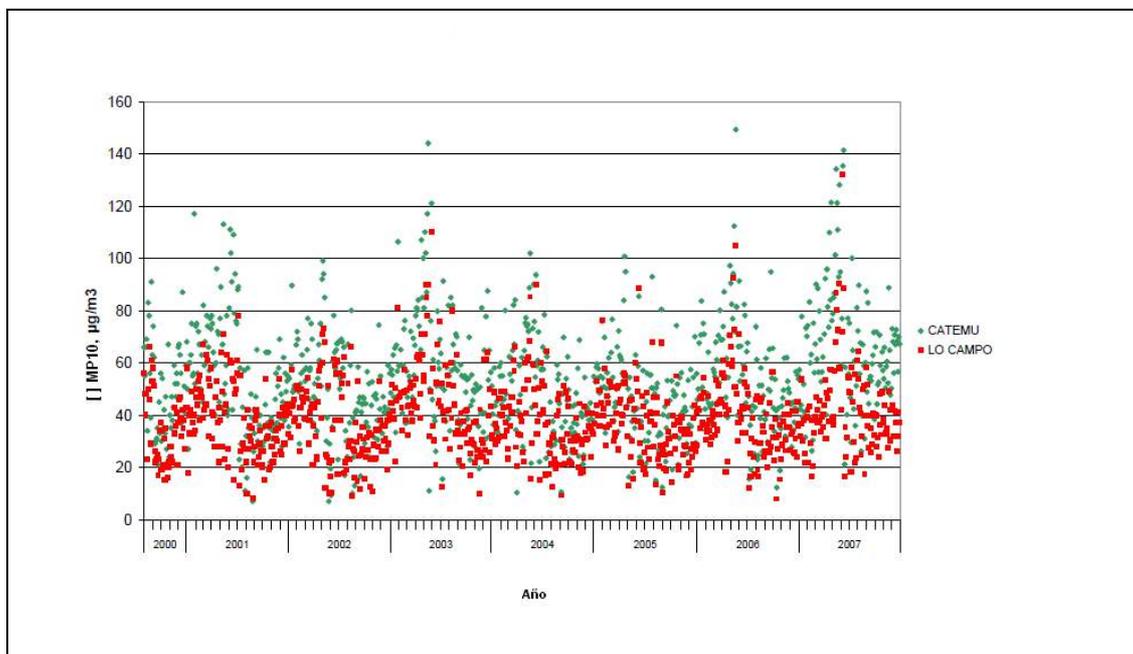


Figura 43. Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de Monitoreo Chagres entre el año 2000 y 2007.

En las estaciones de la red Melón, si bien se observa una tendencia estacional (Figura 45), en La Calera las concentraciones diarias, muestran una distribución más homogénea, al igual que las estaciones Concón Sur y Concón de la red ENAP (Figura 46).

¹³ En San Pedro durante los días 17, 20 y 21 de diciembre de 2004 se realizaron quema de pastizales en un terreno aledaño a la Estación, Observándose el día 20 una concentración de MP_{10} superior a $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En La Palma el 19 de diciembre de 2004 se produjo un incendio de consideración. En la Estación Bomberos el día 25 de febrero de 2005 se obtuvo una alta concentración de MP_{10} ($123 \mu\text{g}/\text{m}^3$), producto del levantamiento de polvo generado por la limpieza del patio y galpón en donde se encuentra instalada la estación. Similar situación se genera en noviembre de 2005 en la Estación Concón Sur donde se realizan trabajos de remoción de tierra. El día 21 de enero de 2003 se registra en la Estación Santa Margarita en Concón trabajos en estructuras metálicas, específicamente corte de material, soldadura y pintura que fueron efectuados a una distancia de 4 metros.



Se tiene que en las estaciones frías se presentan las concentraciones más elevadas, con el consiguiente incremento en los riesgos para la salud de la población más sensible, principalmente adultos mayores.

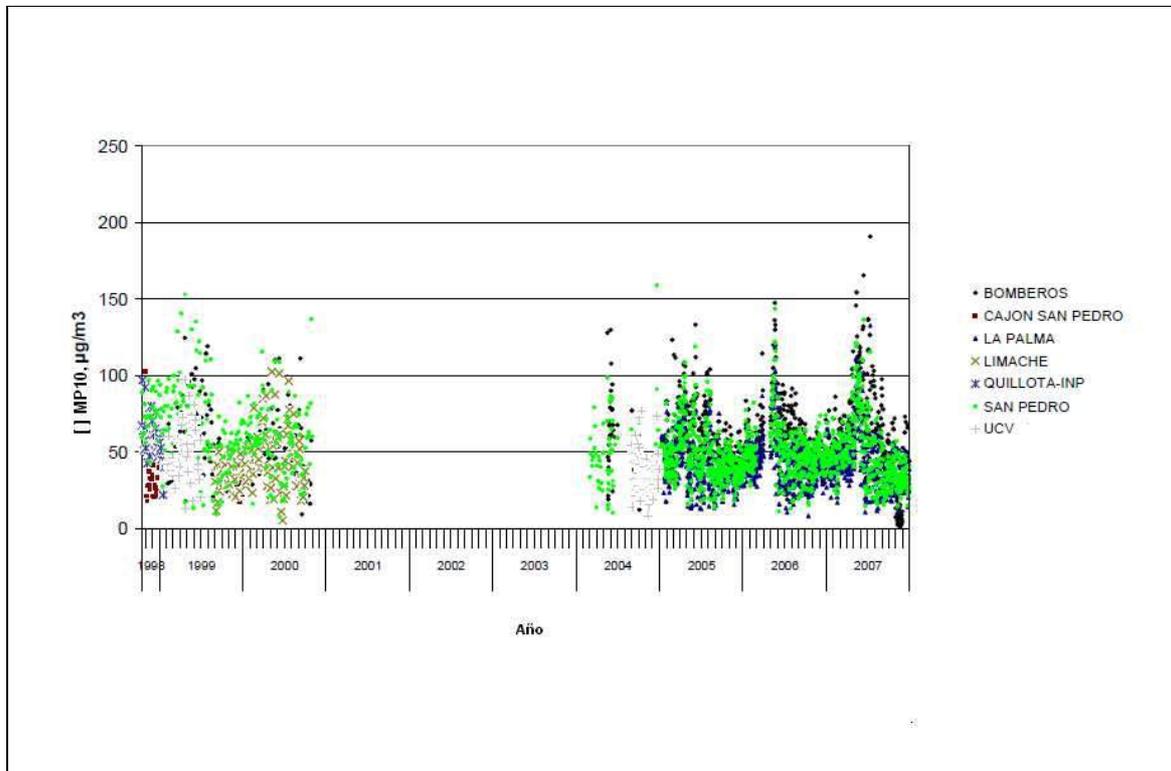


Figura 44. Concentración MP₁₀ diaria medida cada 3 días entre 1998 y 2000 y medida diariamente entre 2004 y 2007 en las estaciones de la red de Monitoreo Nehuenco-San Isidro.

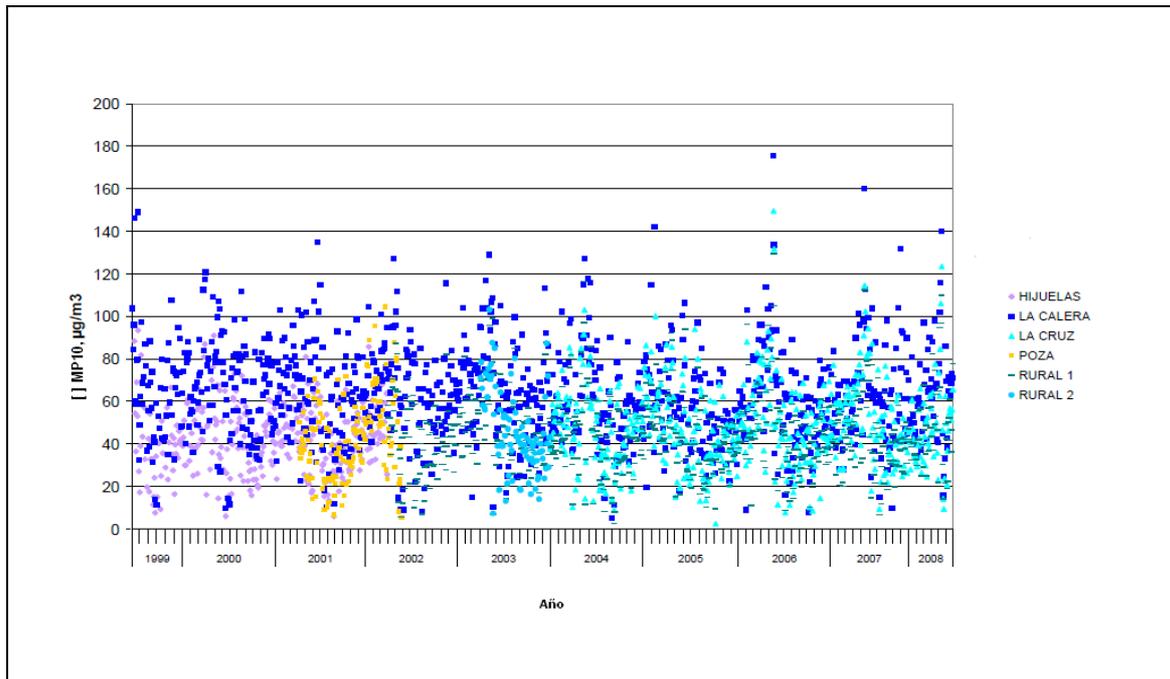


Figura 45. Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de Monitoreo Cement Melón entre el año 1999 y 2008.

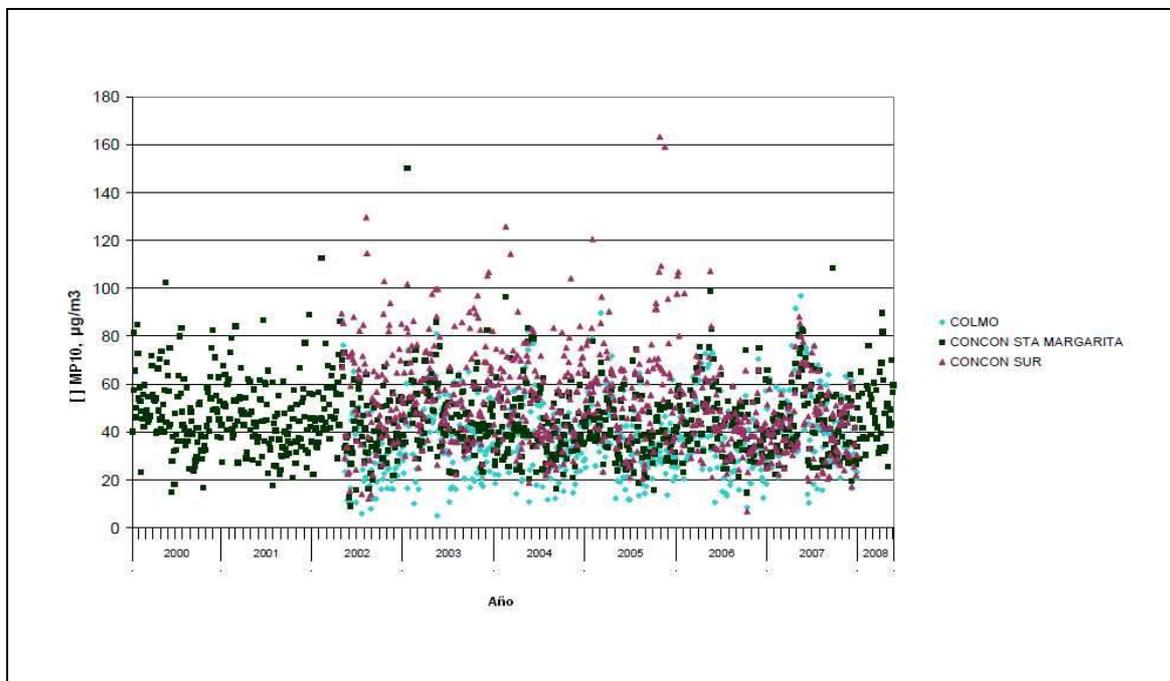


Figura 46. Concentración MP_{10} diaria medida cada 3 días en las estaciones de la red de Monitoreo Enap entre el año 2000 y 2008.

La Figura 47 muestra la distribución de las frecuencias de las concentraciones de MP_{10} en las estaciones de monitoreo que presentan los mayores valores, se tiene que La Calera presenta un promedio de $62,42 (\pm 22,865) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($N= 1065$), por su parte Catemu presenta una concentración promedio de $53,77 (\pm 21,093) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($N= 896$).

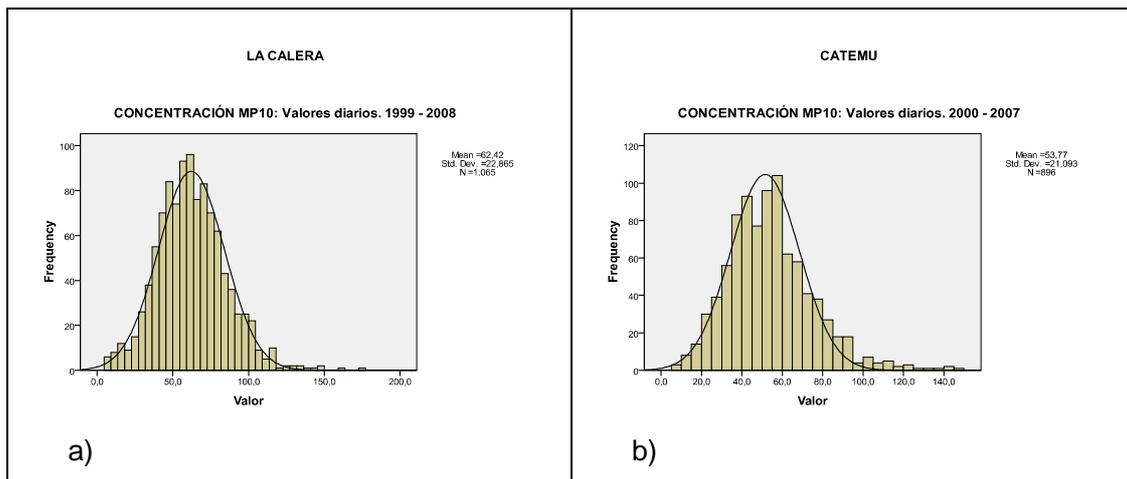


Figura 47. Distribución de frecuencias de concentración de MP_{10} : a) La Calera; b) Catemu

La Figura 48 muestra que La Calera ha presentado promedios trianuales superiores al valor límite definido por la norma primaria de calidad del aire, durante todos los años evaluados, por lo que se puede afirmar que la calidad del aire en La Calera se encuentra en estado de saturación, presentando un promedio trianual en 2008 de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Similar situación se observa en Catemu que presentó un promedio trianual de $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2008. Bomberos presenta superación de la norma a partir del promedio trianual de 2006 con $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, incrementándose a $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2007 y descendiendo en 2008 a $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. San Pedro presenta su máximo trianual con $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2004, pero en los años siguientes presenta promedios trianuales inferiores a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; similar situación se observa en Concón Sur que estuvo en situación de saturación durante 2005 y 2006 con valores de $57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, descendiendo a partir de 2007 a los $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y llegando en 2008 a $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No obstante, se observa que, salvo las estaciones Rural 2 y Lo Campo, todas se han mantenido en valores de latencia, es decir con valores iguales ó superiores al 80% del límite normado de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a lo expuesto, es notoria la excedencia que presentan todas las estaciones respecto al límite recomendado por la OMS de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Una aproximación al background en la cuenca del Aconcagua se obtiene de los valores registrados durante 6 campañas



de monitoreo en la zona rural de Los Caleos (Nogales) entre 2004 y 2007¹⁴ con un promedio aproximado de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo a las características del sector de Los Caleos, el MP_{10} tiene preferentemente un origen natural consistente en polvo en resuspensión, por lo que se puede presumir que sobre dicho valor los aportes en la concentración tienen un origen antropogénico; este aspecto se aborda más adelante mediante la caracterización química del material particulado.

Tomando en consideración los informes de la OMS que indican que sobre una concentración anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, existiría un riesgo de mortalidad prematura de a lo menos de 6% respecto de una concentración de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cercana al valor del background observado en el sector de Los Caleos, se tiene que tanto en La Calera, Catemu, Bomberos y Concón Sur existiría una alta probabilidad de incremento en la mortalidad prematura en la población más sensible.

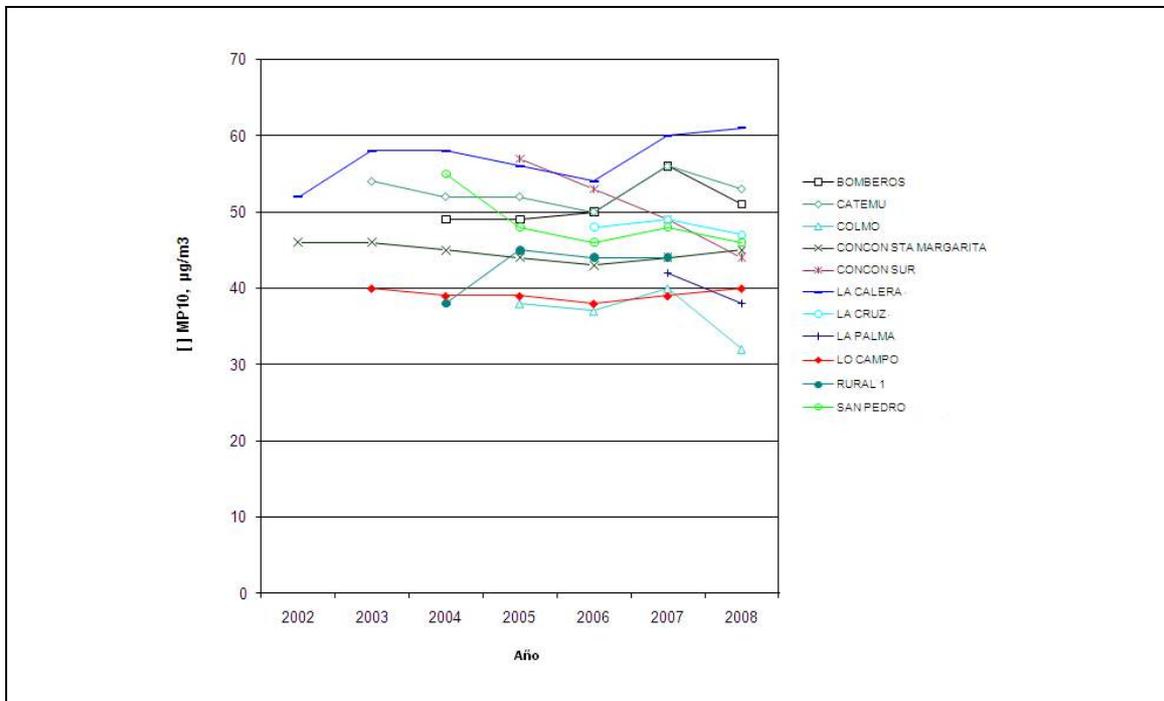


Figura 48. Concentración MP_{10} trianual promedio para el período entre los años 2002 y 2008.

Los registros diarios de las concentraciones de MP_{10} no muestran valores superiores a los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el percentil 98. En general, no se observan tendencias similares a los promedios anuales, sin embargo, se observa un aumento en el percentil 98 desde 2004 en adelante en las estaciones Catemu, Bomberos y San Pedro. Las dos primeras, en 2007 llegan a valores de $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. La Calera durante el período 2000 - 2008, no presentó

¹⁴ Declaración de Impacto Ambiental "Continuación Norte Rajo Abierto El Soldado". Anglo American Sur S.A. 2007.



excedencias a los $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, manteniéndose entre 100 y $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, salvo en el año 2007 donde se registran $96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 49).

Tomando en consideración los informes de la OMS que indican que para concentraciones de MP_{10} iguales o superiores a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, existiría a lo menos un incremento de 2,5% en la mortalidad diaria respecto del valor de referencia de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observa de las figuras antes citadas que las estaciones monitoras que presentan mayores excedencias a los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y por ende, niveles riesgosos para la salud son Catemu, Bomberos, San Pedro, La Calera y Concón Sur.

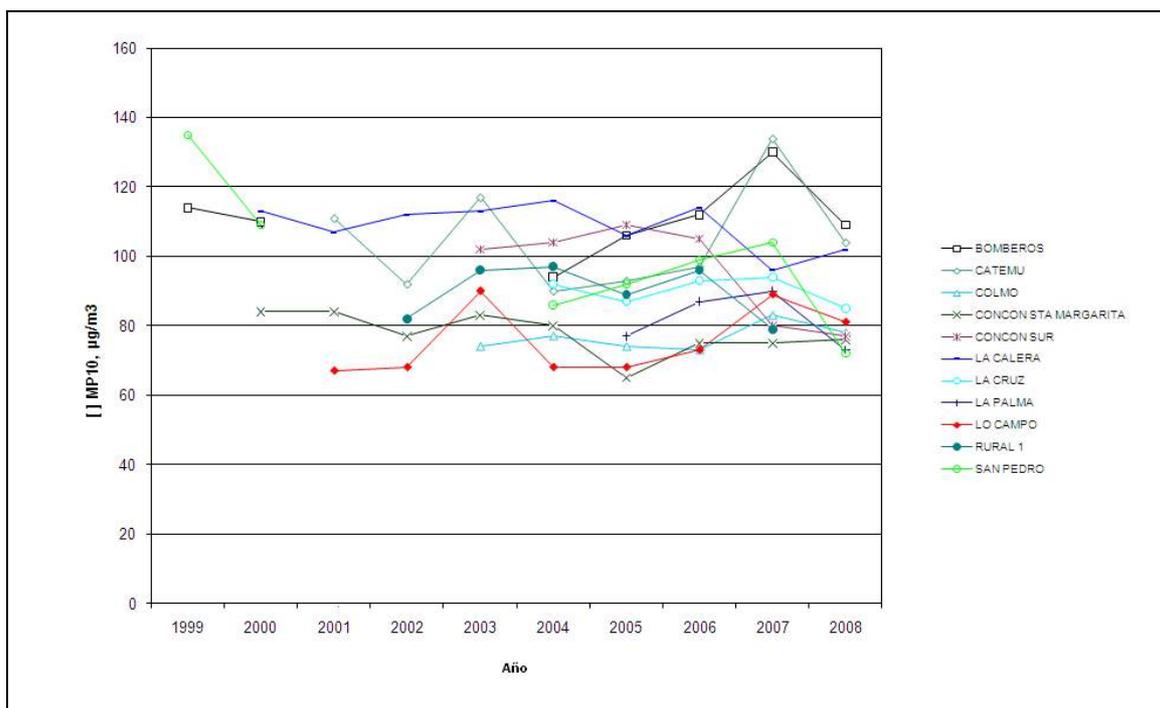


Figura 49. Concentración MP_{10} promedio anual del percentil 98 diario para el período entre los años 1999 y 2008

La única estación de monitoreo donde se tiene datos de $\text{MP}_{2,5}$ es la estación Concón-Santa Margarita perteneciente a la red de monitoreo ENAP. Se observa que los promedios trianuales de 2004 a 2007 no superan los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De acuerdo con el Anteproyecto de Norma Primaria para $\text{MP}_{2,5}$ no existiría excedencia respecto de dicho límite. No obstante, comparado con el límite recomendado por la OMS de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los valores registrados muestran excedencia. En Chile existe Norma Primaria para el $\text{MP}_{2,5}$ de reciente publicación (DS 12/2011), cuyo límite de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ será aplicable a partir de 2012 (Figura 50).

Respecto al promedio trianual del percentil 99 diario, los valores de $\text{MP}_{2,5}$ medidos en la estación Concón- Santa Margarita, no superan los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estando por debajo del límite de la



Norma Primaria para $MP_{2.5}$ de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, supera el límite definido por la OMS, es decir $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ver Figura 50).

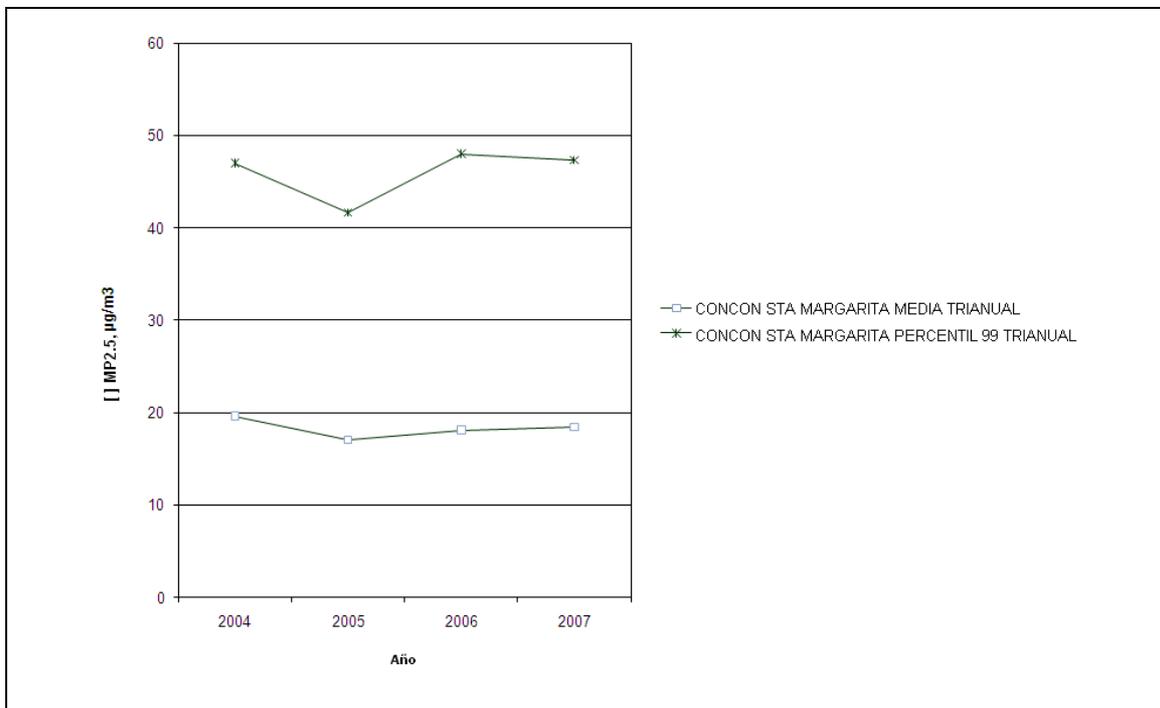


Figura 50. Concentración $MP_{2.5}$ trianual promedio para el período entre los años 2002 y 2007 y promedio trianual del percentil 99 diario para el período entre los años 2002 y 2007.

5.3. Emisiones atmosféricas

El análisis de las declaraciones de emisiones 2006 de las fuentes localizadas en las comunas del área de estudio, muestran algunos resultados relevantes para establecer el origen de las emisiones de los contaminantes estudiados.

5.3.1. Emisiones de SO_x

En la zona de estudio se declaran emisiones por 22.268 toneladas de SO_x en el año 2006. La comuna de Catemu presentó las mayores emisiones anuales de SO_x con 13.907 t/año. También resultaron significativas las emisiones en la comuna de Quillota con 5.056 t/año (Figura 51). En la comuna de Catemu la principal fuente de SO_x es la fundición Chagres; en Quillota las fuentes principales corresponden a las centrales termoeléctricas San Isidro y Nehuenco. Como fuentes relativamente menores se encuentran la refinería de petróleo ENAP en Concón y la fábrica de cementos Melón en La Calera (Figura 52 a.).

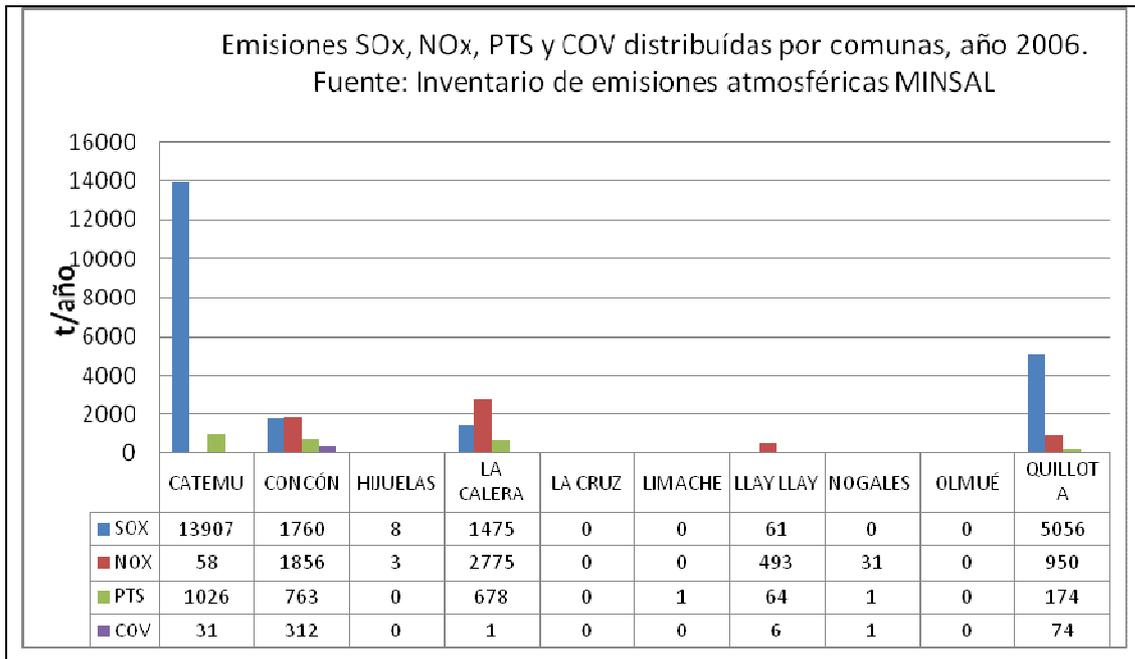


Figura 51. Emisiones de SO_x, NO_x, PTS y COV, por comunas. Año 2006.

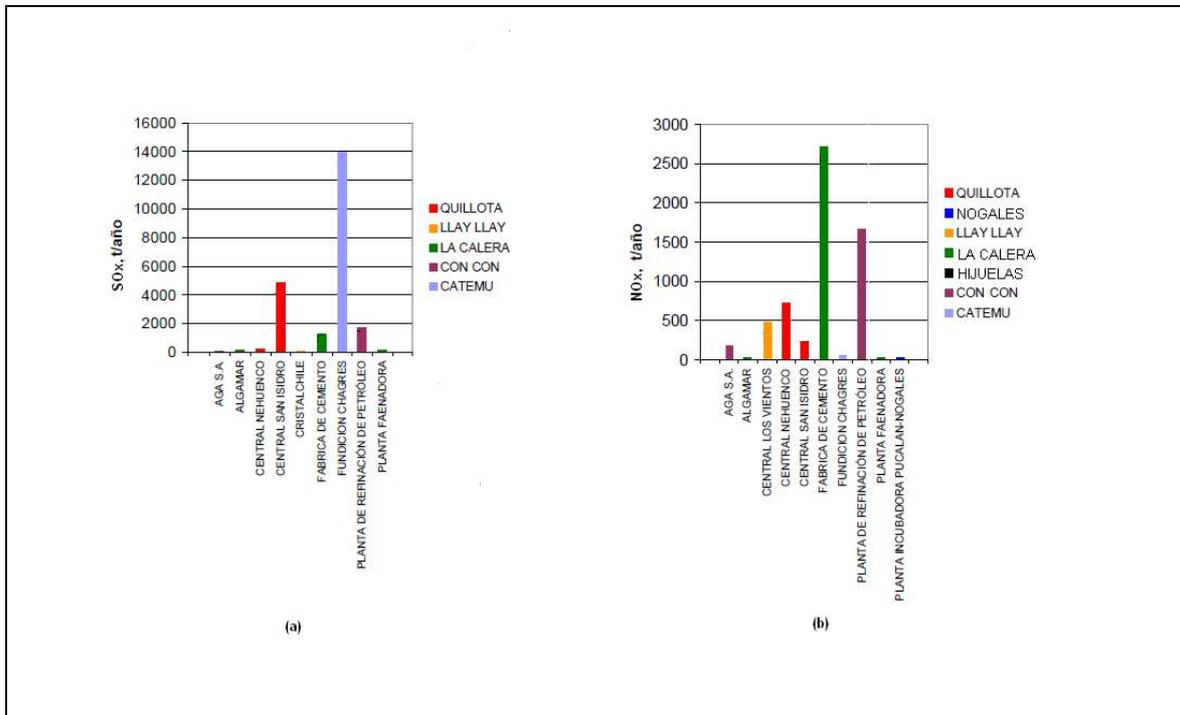


Figura 52. Emisiones de SO_x (a) y NO_x (b) por establecimiento. Año 2006.



5.3.2. Emisiones de NO_x

En el año 2006 en la zona de estudio se declaran emisiones por un total de 6.166 t de NO_x. La comuna de La Calera presentó las mayores emisiones de NO_x con 2.775 t/año; también es significativo el aporte de las emisiones en la comuna de Concón con 1.855 t/año. Emisiones en Quillota y Llay Llay son de 950 t/año y 493 t/año, respectivamente (Figura 51). La principal fuente emisora de NO_x en La Calera es la fábrica de cemento Melón con 2.720 t/año. En Concón la principal emisora de NO_x es la refinería de petróleo ENAP con 1.665 t/año; un aporte menor, lo constituye la empresa AGA S.A. con una emisión de 181 t/año. En Quillota las centrales termoeléctricas Nehuenco y San Isidro aportan en conjunto 947 t/año de NO_x siendo la primera la de mayor aporte (719 t/año). En Llay Llay el aporte de 472 t/año corresponde a la central termoeléctrica Los Vientos. Las emisiones de NO_x procedentes de la Fundición Chagres son de 58 t/año (Figura 52 b.).

5.3.3. Emisiones de PTS

En el año 2006 en la zona de estudio se declararon emisiones de PTS por un total de 2.706 toneladas de PTS. La comuna de Catemu presenta las mayores emisiones de PTS con 1.026 t/año; las emisiones en las comunas de Concón y La Calera fueron 763 t/año y 678 t/año, respectivamente (figuras 51 y 53 a.). Las emisiones de PTS en Catemu proceden de fundición Chagres; en Concón provienen de la refinería de petróleo ENAP y en La Calera de la fábrica de cementos Melón. De menor cuantía son las emisiones de las centrales termoeléctricas Nehuenco y San Isidro en Quillota y las emisiones de la Central termoeléctrica Los Vientos en Llay Llay.

5.3.4. Emisiones de COV

En Concón, la emisión de la refinería de petróleo ENAP es la más importante con 302 t/año; una emisión menor corresponde a AGA S.A. con 10 t/año, siendo las mayores emisiones de estos contaminantes en la zona de estudio. En Quillota las centrales termoeléctricas Nehuenco y San Isidro aportan en conjunto 74 t/año de COV y en Catemu la emisión principal de COV corresponde a la Fundición Chagres con 31 t/año. Las emisiones localizadas en la zona de estudio corresponden a 424 t/año (figuras 51 y 53 b.).

5.3.5. Emisiones de Arsénico

El año 2006¹⁵ las emisiones de As desde la fundición Chagres fueron de 84 t/año, mientras que el año 2007¹⁶ disminuyó a 47 t/año, siendo por lo tanto emisiones inferiores a las normadas en el DS 165/1999 de 95 t/año.

¹⁵ Reporte 2005-2006 del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, RETC de Noviembre 2008.

¹⁶ Reporte 2005-2007 del Registro de emisiones y transferencias de contaminantes, RETC de Marzo de 2010.

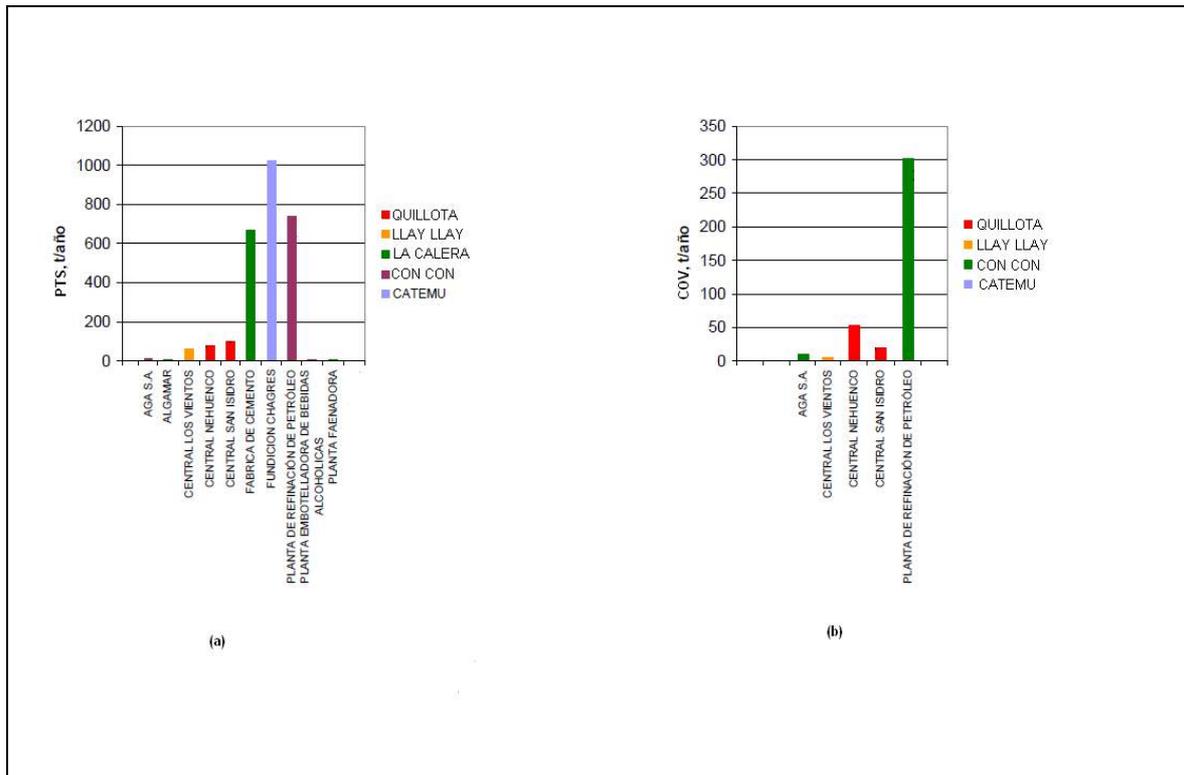


Figura 53. Emisiones de PTS (a) y COV (b) por establecimiento. Año 2006.

5.4. Concentraciones anuales de elementos traza en el MP_{10} y sus tendencias durante el período 1999 - 2008

5.4.1. Arsénico (As)

La Figura 54 muestra las concentraciones anuales promedio de As. La estación Lo Campo presenta las más altas concentraciones con valores de $154 (\pm 103) \text{ ng/m}^3$ y $140 (\pm 74) \text{ ng/m}^3$ en 2005 y en 2006, respectivamente. En la estación Catemu se observan valores inferiores a Lo Campo, pero superiores al resto de las estaciones, alcanzando en 2005 $108 (\pm 87) \text{ ng/m}^3$. La tendencia de la concentración de As en Lo Campo y Catemu, experimenta una clara disminución con valores de $81 (\pm 43) \text{ ng/m}^3$ y $65 (\pm 42) \text{ ng/m}^3$, respectivamente en ambas estaciones en 2007. Las concentraciones anuales promedio para los años 2006 - 2007 coinciden con la disminución en las emisiones de As emitido desde la Fundición Chagres. Para este estudio no se contó con mediciones de As en el MP_{10} para los años 2002, 2003 y 2004 en Lo Campo y Catemu.

Las restantes estaciones presentan concentraciones de As notoriamente inferiores, con valores que no superan los 50 ng/m^3 . En Colmo, Concón- Santa Margarita y Concón Sur, las mayores concentraciones de As se obtuvieron en 2002 con valores de $48 (\pm 38) \text{ ng/m}^3$, $48 (\pm 45) \text{ ng/m}^3$ y $42 (\pm 42) \text{ ng/m}^3$, respectivamente. Tras registrarse estos máximos se observa una



tendencia decreciente que solo se revierte en 2008, cuando Concón Sur alcanza un valor de 41 (± 34) ng/m^3 . La Calera presenta su máximo valor promedio en 2005 con 40 (± 36) ng/m^3 y un descenso que se revierte a partir de 2007 llegando en 2008 a los 40 (± 38) ng/m^3 .

5.4.2. Cobre (Cu)

La Figura 54 muestra que las mayores concentraciones de Cu se presentan en la estación Concón- Santa Margarita, con tendencia ascendente desde el año 2005 y un máximo en 2008 de 791 (± 508) ng/m^3 . Tendencia ascendente presenta también hasta 2007 la estación Concón Sur, alcanzando 531 (± 461) ng/m^3 . Lo Campo en términos comparativos presenta concentraciones de Cu inferiores y con marcada tendencia descendente a partir del valor promedio de 2001 de 594 ng/m^3 ($n=1$), obteniéndose en 2007 un promedio de 126 (± 27) ng/m^3 . En términos generales las concentraciones de Cu en Lo Campo son mayores a las de Catemu, no obstante a partir de 2005, mientras en Lo Campo tienden a disminuir, en Catemu aumenta alcanzando en 2007 los 178 (± 130) ng/m^3 . Colmo presenta las menores concentraciones anuales que no superan los 100 ng/m^3 .

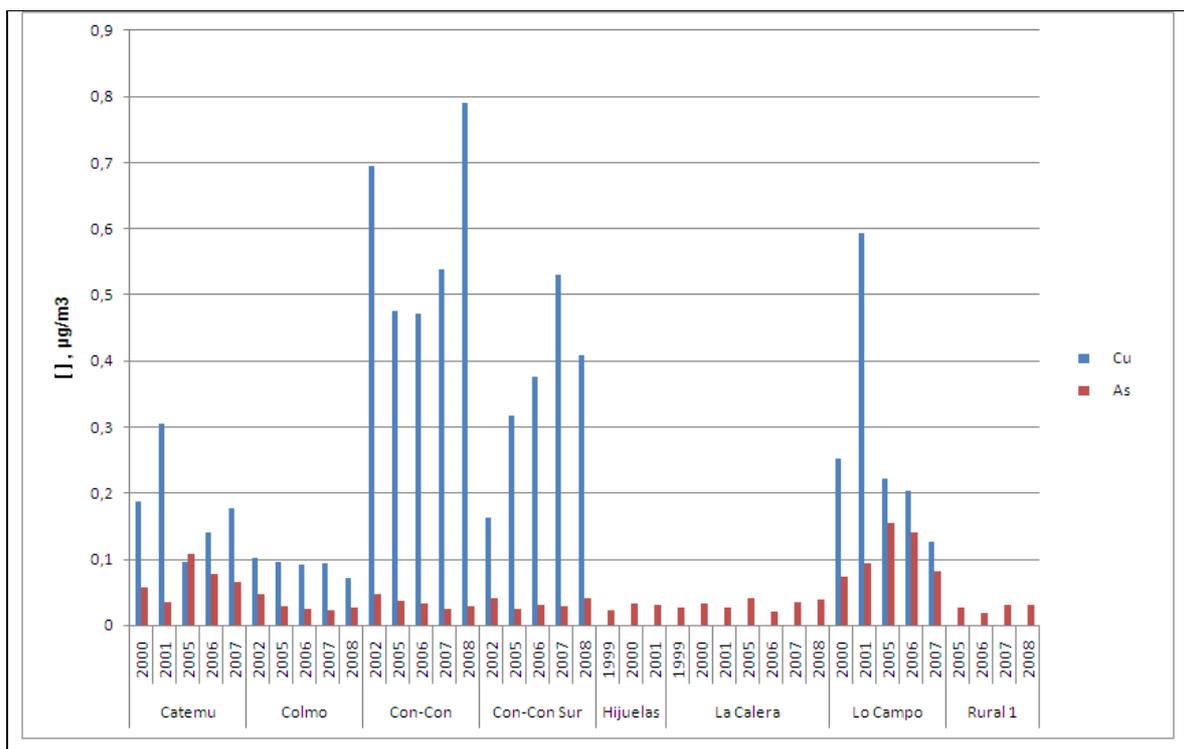


Figura 54. concentraciones anuales de As y Cu en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio



5.4.3. Cadmio (Cd)

Las mayores concentraciones de Cd en Lo Campo y Catemu en 2001 fueron de 14 ng/m^3 ($n=1$) y 13 ng/m^3 ($n=1$), respectivamente. Salvo estos valores puntuales de las concentraciones anuales, en ambas estaciones muestra valores del orden inferior a 3 ng/m^3 en Lo Campo y 2 ng/m^3 en Catemu. En el resto de las estaciones, las concentraciones fueron aún menores, excepto en La Calera y Rural 1 donde se observan en 2006 concentraciones puntualmente altas con promedio de $8,4 (\pm 7,6; n=2) \text{ ng/m}^3$ y $9,4 \text{ ng/m}^3$ ($n=1$) en 2006 (Figura 55).

5.4.4. Mercurio (Hg)

La Figura 55 muestra las bajas concentraciones de Hg en Catemu y Lo Campo. En Rural 1 y La Calera, se observan en 2007 concentraciones puntualmente muy elevadas de $11,5 (\pm 11,3; n=4) \text{ ng/m}^3$ en Rural 1 y $8,0 (\pm 8,5; n=3) \text{ ng/m}^3$ en La Calera. Cabe indicar que en general las concentraciones en la red Melón presentaron valores inferiores al límite de detección.

5.4.5. Molibdeno (Mo)

La Figura 55 muestra una notoria disminución en las concentraciones de Mo entre el año 2001 y el 2005. En general no se observan diferencias significativas en las concentraciones de Mo en Lo Campo y Catemu, pese a que Lo Campo presenta valores de concentración levemente superiores con $4,1 (\pm 1,6) \text{ ng/m}^3$ en 2007, mientras Catemu registra un promedio de $3,4 (\pm 0,6) \text{ ng/m}^3$.

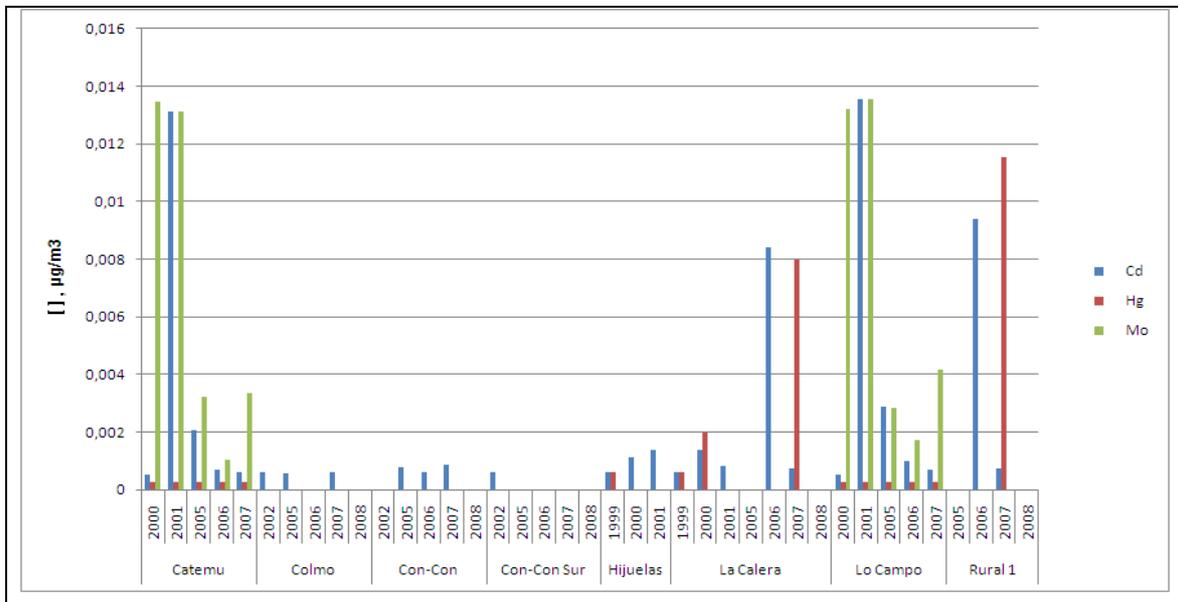


Figura 55. Concentraciones promedio anuales de Cd, Hg y Mo en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio



5.4.6. Vanadio (V)

La concentración de V presenta su mayor valor para 2008 en Rural 1 con $52 (\pm 98) \text{ ng/m}^3$ (Figura 56), donde solo un 53 % de las mediciones estuvo sobre el límite de detección. Cabe indicar que el 27.05.2008, se registró un valor puntual elevado que llegó a los 293 ng/m^3 .

5.4.7. Talio (Tl)

Las concentraciones de Tl se encuentran generalmente bajo el límite de detección (Figura 56). En 2001 y entre 2005 y 2008 las concentraciones están bajo el límite de detección ($0,6 \text{ ng/m}^3$). No obstante, en 1999 y 2000 se detectaron concentraciones promedio de $50 (\pm 37) \text{ ng/m}^3$ y $31 (\pm 1) \text{ ng/m}^3$ en Hijuelas respectivamente y de $35 (\pm 11) \text{ ng/m}^3$ y $30 (\pm 1) \text{ ng/m}^3$ en La Calera.

5.4.8. Manganeso (Mn)

El Mn se midió solamente en las estaciones de la red Chagres, Lo Campo y Catemu. La Figura 56 muestra que las concentraciones de Mn en Catemu manifiestan una tendencia creciente de 2005 a 2007 contraria a la evidenciada para As y Cd en dicha estación para igual período. También se observa que las concentraciones anuales de Mn en Catemu son superiores a las observadas en Lo Campo a diferencia de lo observado para As, Cd y Cu, donde Catemu presentó menores concentraciones para dichos elementos traza. La tendencia creciente en las concentraciones de Mn en Catemu de 2005 a 2007 donde llega a valores de $19 (\pm 7) \text{ ng/m}^3$, es contraria a Lo Campo que disminuye en el mismo período a $7 (\pm 2) \text{ ng/m}^3$. Lo anterior, supondría que el Mn presente en el MP_{10} tiene un origen diferente respecto del As, Cd y Cu atribuibles estos a las emisiones del proceso de fundición de cobre.

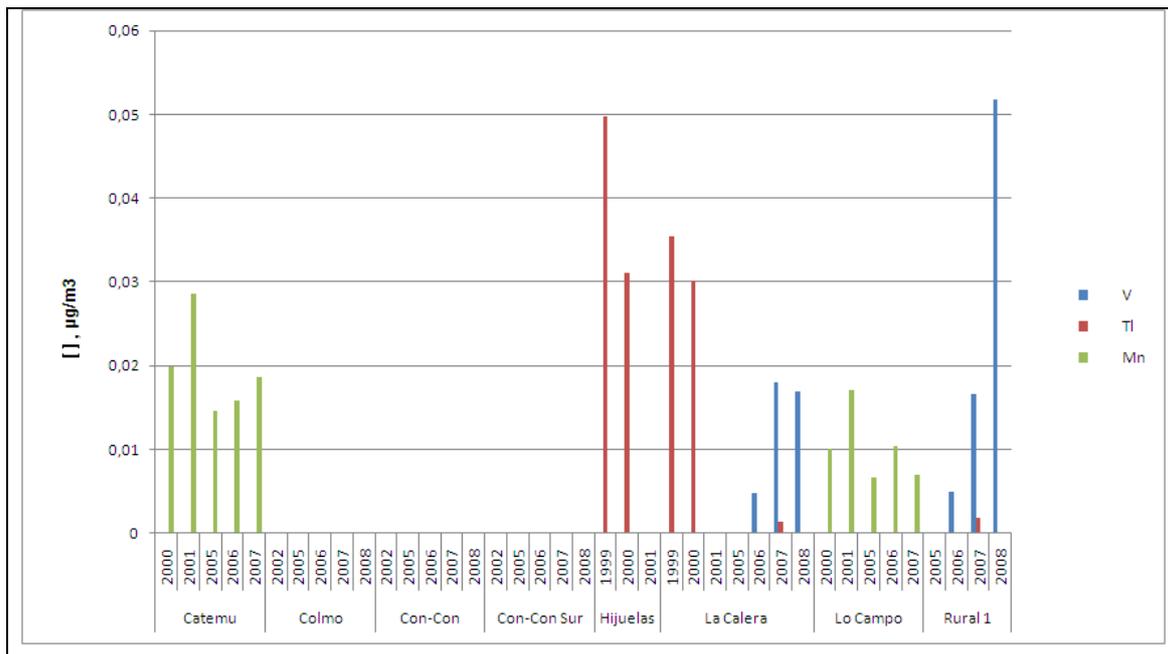


Figura 56. Concentraciones promedio anuales de V, TI y Mn en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio

5.4.9. Antimonio (Sb)

El Sb se midió en las estaciones de monitoreo de la red Melón. La Figura 57 muestra que las concentraciones de las estaciones La Calera y Rural 1 presentan una disminución del 2006 al 2007, disminuyendo en La Calera de $10 (\pm 9) \text{ ng/m}^3$ a $3 (\pm 4) \text{ ng/m}^3$ y en Rural 1 de $9 (\pm 6) \text{ ng/m}^3$ a $3 (\pm 3) \text{ ng/m}^3$. En 2008 se observa un incremento en ambas estaciones siendo más elevado el valor de la estación Rural 1 con $7 (\pm 10) \text{ ng/m}^3$ mientras en La Calera se incrementa a $5 (\pm 4) \text{ ng/m}^3$.

5.4.10. Níquel (Ni)

La concentración de Ni presenta su mayor valor en 2008 en Rural 1 con $9 (\pm 4) \text{ ng/m}^3$ (Figura 57). Las concentraciones medidas en las estaciones de la red ENAP presentan una baja representatividad, con menos del 34% de las muestras sobre el límite de detección, por lo que no es posible determinar con claridad el nivel de las concentraciones, no obstante se aprecia una tendencia al alza en Concón- Santa Margarita a partir de 2005 mientras que en Concón Sur esta tendencia al alza se observa desde 2006. Tendencia al alza se observa en las estaciones La Calera y Rural 1 obteniéndose las mayores concentraciones en 2008.



5.4.11. Cromo (Cr)

La Figura 57 muestra que de las tres estaciones de monitoreo donde se midió este elemento, La Calera y Rural 1 presentan la mayor representatividad pese a que ninguna superó el 50% de los valores sobre el límite de detección. No obstante, se observa una tendencia decreciente en las tres estaciones de monitoreo. Las mayor concentraciones se detectaron en 1999 con $12,7 (\pm 2,8) \text{ ng/m}^3$. Sin embargo hacia 2008 disminuyó a $3,1 (\pm 0,9) \text{ ng/m}^3$.

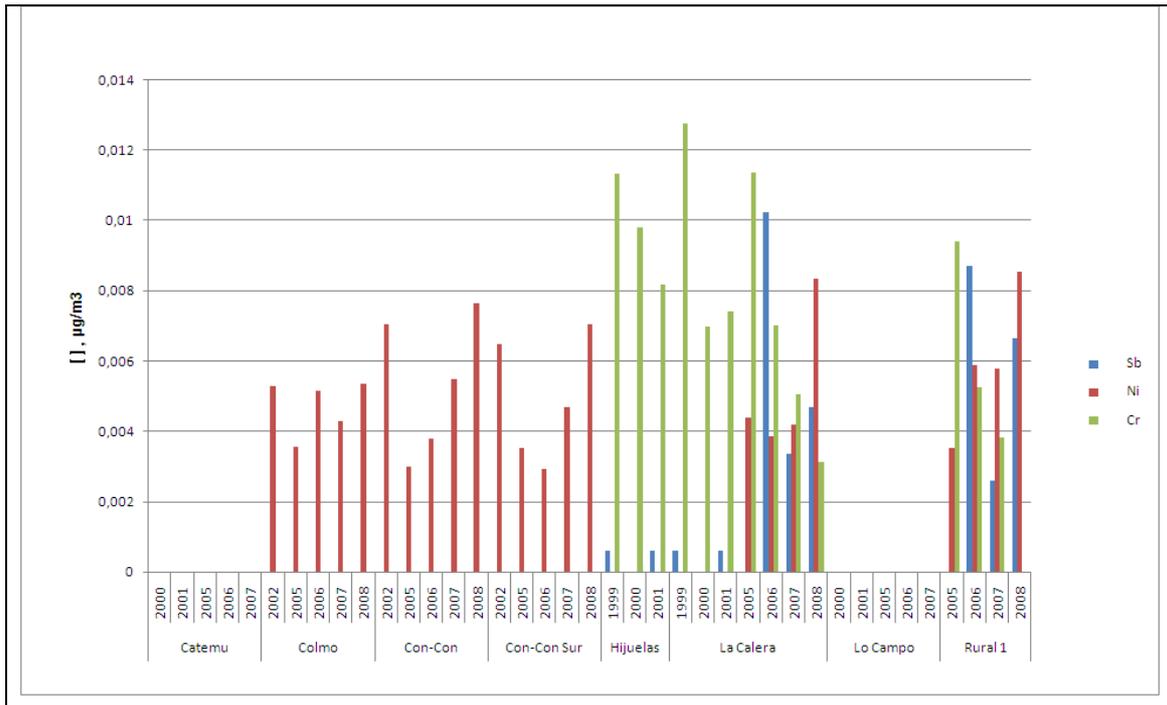


Figura 57. Concentraciones promedio anuales de Sb, Ni y Cr en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio

5.4.12. Plomo (Pb)

Las concentraciones de Pb en el MP_{10} en las estaciones de la red Melón muestran una tendencia descendente entre los años 1999-2000 y 2008 (Figura 58). En general, las concentraciones no superan la norma primaria para plomo (DS 136/2000) que establece un límite de 500 ng/m^3 .

5.4.13. Zinc (Zn)

La Figura 58 muestra que las mayores concentraciones de Zn se presentan en La Calera con una tendencia decreciente desde 2005 y un promedio anual de $75 (\pm 63) \text{ ng/m}^3$ en 2008, seguido de Rural 1 con $52 (\pm 40) \text{ ng/m}^3$ en 2008. En las estaciones de la red Chagres, se observa



una disminución de las concentraciones entre el 2001 y el 2007, aunque no hay mediciones entre 2002 y 2004.

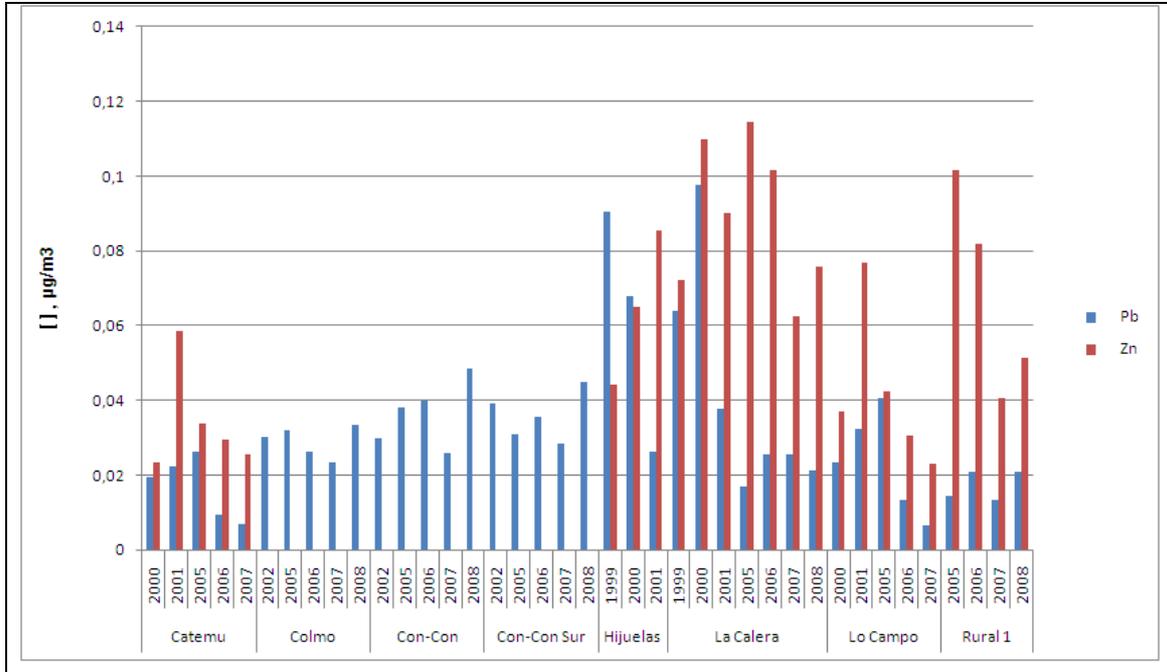


Figura 58. Concentraciones anuales de Pb y Zn en filtros de MP_{10} de las estaciones de monitoreo de la zona de estudio

5.4.14 Concentraciones promedio de los elementos traza en el MP_{10} para el período de estudio de 1999 – 2008.

Los promedios de todas las muestras de elementos traza se exponen a continuación en el Cuadro 14. Los elementos que presentan las mayores concentraciones en la zona de estudio corresponden a Cu, siendo Concón- Santa Margarita la que presenta la mayor concentración con $574 (\pm 482) \text{ ng/m}^3$. Los elementos As, Pb y Zn presentan órdenes de magnitud similares, entre 16 ng/m^3 y 122 ng/m^3 . Las concentraciones más elevadas de As se encuentran en Lo Campo con $122,4 (\pm 72,9) \text{ ng/m}^3$ y Catemu con $79,2 (\pm 72,7) \text{ ng/m}^3$. El Zn presenta sus mayores concentraciones en las estaciones de la red Melón. La Calera con $91,7 (\pm 83,2) \text{ ng/m}^3$ es la estación que presenta las mayores concentraciones de Zn en el área de estudio. Las mayores concentraciones de Pb se observaron en las estaciones Hijuelas con $58,3 (\pm 146,7) \text{ ng/m}^3$ y La Calera con $44,0 (\pm 129,1) \text{ ng/m}^3$. Para el Cr se observan niveles elevados en las estaciones de la red Melón, siendo Hijuelas la que presenta mayor concentración con $10 (\pm 4,0) \text{ ng/m}^3$.



Cuadro 14. Concentraciones promedio de elementos traza en el MP₁₀ (ng/m³) para el período 1999 – 2008.

Estación	As	Cd	Cu	Mn	Hg	Mo	Pb	Zn	Sb	Tl	Ni	V	Cr
Catemu	79	2,3	152	17	0,3	4,4	16	32	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Lo Campo	122	2,6	225	9	0,3	4,7	22	37	S/I	S/I	S/I	S/I	S/I
Colmo	30	0,6	93	S/I	S/I	S/I	28	S/I	S/I	S/I	4,9	S/I	S/I
Concón- Santa Margarita	35	0,8	574	S/I	S/I	S/I	34	S/I	S/I	S/I	6,3	S/I	S/I
Concón Sur	32	0,6	369	S/I	S/I	S/I	34	S/I	S/I	S/I	5,7	S/I	S/I
Hijuelas	30	1,2	S/I	S/I	0,6	S/I	58	67	0,6	37	S/I	S/I	10,0
La Calera	31	1,6	S/I	S/I	4,0	S/I	44	92	5,1	27	4,5	13	7,2
Rural 1	26	2,5	S/I	S/I	11,5	S/I	18	68	5,0	1,8	5,8	18	4,7
Concentración límite	6	5	S/I	150	1000	S/I	500	S/I	S/I	S/I	20	1000	2,5

S/I: Sin información

En análisis normativo de los resultados, indica que Catemu y Lo Campo presentan concentraciones de As superiores al valor recomendado por la OMS de 66 ng/m³ (1:10000). A su vez el valor normado por la Directiva 2004/107/EC para As es de 6 ng/m³, el cual se supera en todas las estaciones. Todas las estaciones presentan concentraciones de Pb muy inferiores a 500 ng/m³ como establecen la OMS, la norma Chilena, y la Directiva 2004/107/EC. En el caso del Ni se observa superación solo del valor límite más exigente definido por la OMS de 2,5 ng/m³ (1:1000000) en las estaciones Colmo, Concón, Concón Sur, La Calera y Rural 1, no obstante dichos valores promedio son notablemente inferiores al valor normado por la Directiva 2004/107/EC de 20 ng/m³. Las concentraciones de Cr están sobre el límite de detección y muestran valores promedio superiores a los 2,5 ng/m³ (1:1000000) sólo en las estaciones Hijuelas, La Calera y Rural 1. El Cd muestra concentraciones inferiores a 5 ng/m³ recomendado por la OMS y normado por la Directiva 2004/107/EC, en todas las estaciones monitoras. Finalmente tanto el Mn como el V presentan valores muy inferiores a los recomendados por la OMS de 150 ng/m³ y 1000 ng/m³, respectivamente. El Cu y el Zn, pese a presentar concentraciones de magnitudes significativas, no se dispone de normas y/o recomendaciones a objeto de establecer niveles de riesgo.

5.4.15 Distribución porcentual

La distribución porcentual de los elementos traza presentes en el MP₁₀ (Figura 59), muestra que en Concón- Santa Margarita el Cu representa el 89% de todos los elementos traza analizados. En Concón Sur es el 84%. El As representa solo un 5% en Concón- Santa Margarita y un 7% en Concón Sur. En Colmo el Cu tiene una participación de 60% y el As un 19%. En esta estación aumenta también la participación del Pb, el que en Concón- Santa Margarita y Concón Sur representa solo un 5% y 8%, respectivamente.

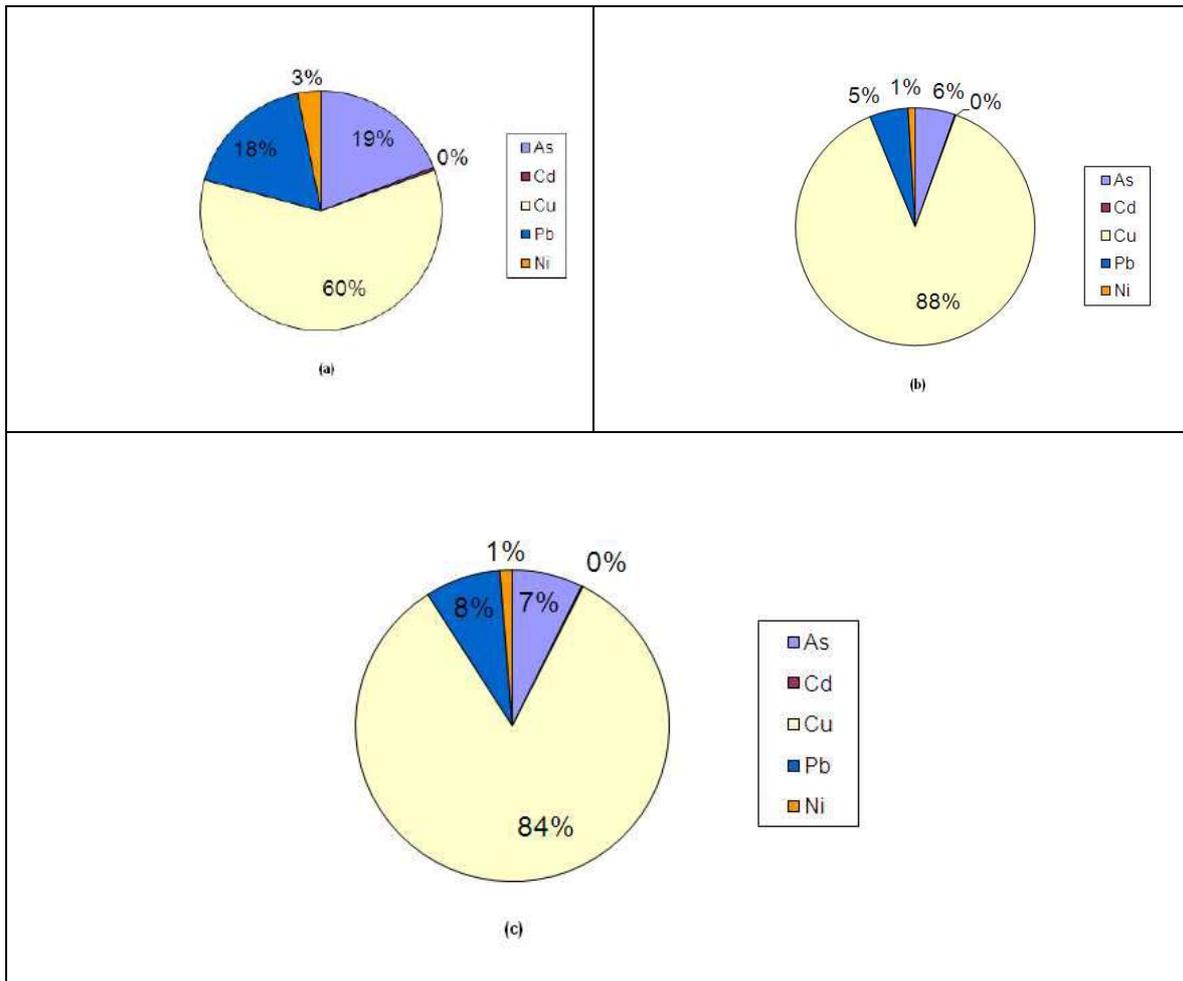


Figura 59. Distribución porcentual de elementos traza en el MP_{10} : Estaciones de monitoreo: a. Colmo; b. Concón- Santa Margarita; c. Concón Sur.

En las estaciones de la red Melón se observa la mayor participación del Zn (Figura 60). En Rural 1 el Zn tiene una participación de 42%, en La Calera un 39% y en Hijuelas un 33%. El Pb tiene gran diferencia entre las estaciones Hijuelas y Rural 1 con 28% y 11% respectivamente; esto podría explicarse porque en los años en que se midió Pb en Hijuelas, 1999 - 2001, aún no se implementaba del todo la eliminación del Pb en las gasolineras. Por su parte la participación del As es similar en las tres estaciones monitoras.

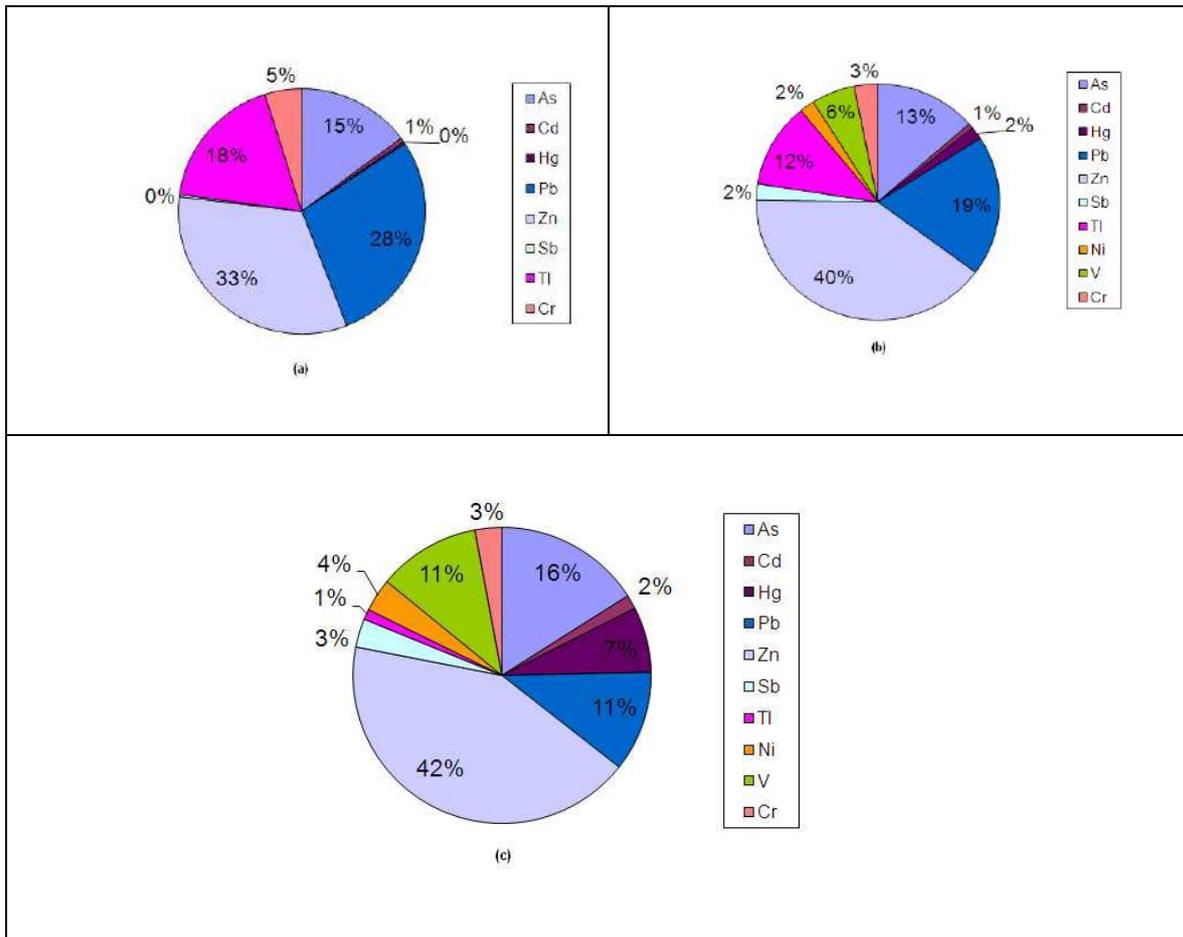


Figura 60. Distribución porcentual de elementos traza en el MP₁₀: Estaciones de monitoreo: a. Hijuelas; b. La Calera; c. Rural 1.

En la red Chagres se observa una alta participación de Cu y As en el MP₁₀; ambos elementos suman el 77% en Catemu y el 82% en Lo Campo (Figura 61). El Zn está presente con 10% en Catemu y 9% en Lo Campo. El Pb está presente en proporciones similares en ambas estaciones con un 5% de participación, al igual que el Mo y Cd con 1%. El Mn presenta diferencias, entre Catemu (6%) y Lo Campo (2%).

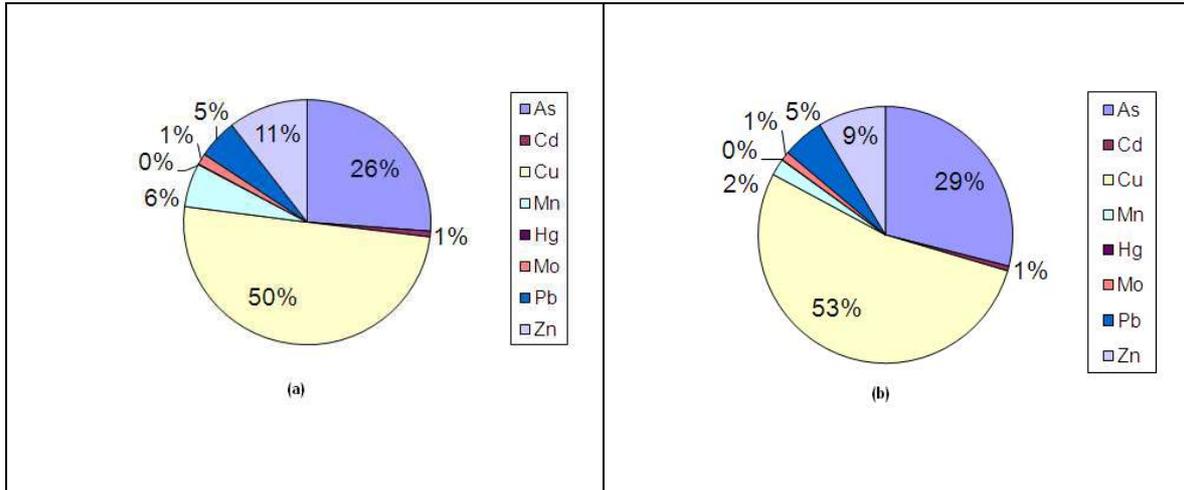


Figura 61. Distribución porcentual de elementos traza en el MP₁₀: Estaciones de monitoreo: a. Catemu; b. Lo Campo.

5.5. Enriquecimiento de los elementos traza

A continuación se expone los factores de enriquecimiento de los elementos traza presentes en el MP₁₀.

5.5.1. Factor de Enriquecimiento (FE) en relación a la composición de la corteza terrestre

El Cuadro 15 muestra el enriquecimiento para los elementos traza analizados, salvo Ni y Mn, evidenciando el origen antrópico de As, Cd, Cu, Mo, Pb y Zn en las diferentes estaciones de monitoreo.

Cuadro 15. Factor de enriquecimiento en el área de estudio de acuerdo a la composición de corteza terrestre

Estación	As	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	Ni
Catemu	2509	1457	157	1	167	53	26	SD
Lo Campo	3877	1647	234	1	179	75	30	SD
Colmo	944	380	97	SD	SD	93	SD	4
Concón- Santa Margarita	1109	507	595	SD	SD	113	SD	5
Concón Sur	1020	380	382	SD	SD	115	SD	4
Hijuelas	963	760	SD	SD	SD	196	55	SD
La Calera	979	1014	SD	SD	SD	148	75	3
Rural 1	814	1584	SD	SD	SD	59	56	4

SD: Sin dato



5.5.2. Factor de Enriquecimiento (FE) en relación a la composición del suelo

Se calculó a su vez el factor de enriquecimiento en relación al suelo local con el objeto de comparar los resultados con los factores de enriquecimiento respecto a corteza terrestre. El Cuadro 16 muestra factores de enriquecimiento que señalan un origen antrópico para todos los elementos traza salvo Mn, cuyo origen sería el suelo. Los FE obtenidos utilizando la composición del suelo, son notablemente inferiores a los obtenidos utilizando la corteza terrestre como referencia. Lo importante sin embargo, es que en ambos casos lo que los FE indican es que todos los elementos estudiados, excepto Mn y Ni tienen un origen antrópico.

Cuadro 16. Factor de enriquecimiento en el área de estudio de acuerdo a la composición de suelo

Estación	As	Cd	Cu	Mn	Mo	Pb	Zn	Ni
Catemu	244	52	96	0,7	77	20	20	SD
Lo Campo	377	58	143	0,4	82	28	23	SD
Colmo	125	37	56	SD	SD	51	SD	18
Hijuelas	47	47	SD	SD	SD	120	20	SD
La Calera	48	63	SD	SD	SD	91	27	10
Rural 1	40	99	SD	SD	SD	37	20	13

SD: Sin dato

5.6. Análisis estadístico por correlaciones binarias y múltiples para los elementos traza

5.6.1. Estaciones de monitoreo red ENAP

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de As, Pb y Cu presente en el MP₁₀ de la estación monitora Concón Santa Margarita, presentó pares de correlaciones significativas para los tres elementos traza. Para el par As - Pb la correlación es significativa al 1% ($r=0,683$; $n= 65$; $p<0,01$). Para los pares Cu - Pb ($r=0,285$; $n= 66$; $p<0,05$) y As - Cu ($r=0,233$; $n= 90$; $p<0,05$) la significación alcanza al 5%.

El Cuadro 17 muestra el análisis de componentes principales con rotación Varimax para As, Pb y Cu. Se observan 2 factores que explican el 90% de la varianza total. El primero explica el 56% de la varianza total, asocia As y Pb con una fuente antropogénica común para ambos elementos. Un segundo factor, que explica un 34% de la varianza total, asocia una segunda fuente antropogénica para el Cu. En consecuencia se detectan 2 fuentes antropogénicas para los elementos traza As, Pb y Cu en el sector urbano de Concón. La presencia de As y Pb se puede atribuir a procesos de combustión antropogénica de combustibles fósiles, sin embargo no es posible adjudicar con certeza la presencia del par mencionado a un origen urbano o industrial. Por su parte la presencia de Cu se podría atribuir a la única fuente cercana asociada a la emisión de dicho elemento, correspondiente a la refinería de cobre de Ventanas, suposición que se sustentaría en la trayectoria de las parcelas de viento procedentes desde dicha zona hacia la zona de Concón



e interior de la cuenca del Aconcagua, situación informada por CENMA (2001). De verificarse aquel origen para las concentraciones de Cu en Concón, se podría tener una estimación de la magnitud del área de influencia de dicha refinería.

Cuadro 17. Análisis de componentes principales,
estación Concón – Santa Margarita, período 2002 - 2008

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX		
	Componentes	
Elementos	1	2
As	,920	,070
Cu	,132	,990
Pb	,898	,179
Autovalores	1,826	,861
% de la Varianza	55,662	33,917
Acumulado %	55,662	89,579

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de As, Pb y Cu presente en el MP₁₀ de la estación monitora Concón Sur, muestra una correlación al 1% para el par As - Pb ($r=0,869$; $n= 56$; $p<0,01$) y al 5% para los pares Cu - Pb ($r=0,306$; $n= 57$; $p<0,05$) y As - Cu ($r=0,243$; $n= 81$; $p<0,05$). El análisis de componentes principales con rotación Varimax a los registros de As, Pb y Cu muestra en el Cuadro 18, 2 factores que explican el 96% de la varianza total. El primer factor explica el 62% de la varianza total muestra la asociación entre As y Pb. Un segundo factor explica un 34% de la varianza total y señala una segunda fuente antropogénica para Cu. En consecuencia se observan 2 fuentes antropogénicas que explicarían la procedencia de los elementos traza As, Pb y Cu en el sector sur de Concón. La presencia de As y Pb puede ser atribuida a procesos de combustión antropogénica de combustibles fósiles en usos urbanos y/o industriales. Al igual que en la estación monitora Concón Santa Margarita la presencia de Cu se puede atribuir a la refinería de cobre de Ventanas, suposición que se sustenta en la trayectoria de las parcelas de viento procedentes desde dicha zona hacia la zona de Concón e interior de la cuenca del Aconcagua, situación informada por CENMA (2001).



Cuadro 18. Análisis de componentes principales,
estación Concón Sur, período 2002 - 2008

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX		
	Componentes	
Elementos	1	2
As	,964	,094
Cu	,139	,990
Pb	,950	,180
Autovalores	2,012	,861
% de la Varianza	61,709	34,044
Acumulado %	61,709	95,752

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de As, Pb y Cu presente en el MP_{10} de la estación monitorea Colmo, presenta una correlación al 1% para Cu y Pb ($r=0,958$; $n=60$; $p<0,01$), As y Pb ($r=0,774$; $n=60$; $p<0,01$) y As y Cu ($r= 0,703$; $n=85$; $p<0,01$). Del análisis de componentes principales con rotación Varimax, se observan 2 factores que explican el 99% de la varianza total. Un primer factor explica el 59% de la varianza total, muestra una fuente para Cu y Pb y un segundo factor que señala una fuente diferenciada para As (ver Cuadro 19). Es plausible que dicha fuente corresponda a material particulado resuspendido transportado por los vientos que ingresan a la cuenca del Aconcagua depositando las partículas en el suelo que luego es resuspendido producto del viento y del tránsito en dicha zona rural. Sin embargo se carece de información sobre la composición química de los suelos de este sector.

Cuadro 19. Análisis de componentes principales,
estación Colmo, período 2002 - 2008

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX		
	Componentes	
Elementos	1	2
As	,404	,915
Cu	,924	,362
Pb	,874	,465
Autovalores	2,631	,333
% de la Varianza	59,360	39,433
Acumulado %	59,360	98,793



5.6.2. Estaciones de monitoreo red Melón

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de MP_{10} de la estación La Calera, comprendidas entre los años 1999 y 2008¹⁷, muestra una correlación al 1% para el par Zn - Pb ($r= 0,807$; $n= 154$; $p< 0,01$) y al 5% para los pares Zn - Ni ($0,289$; $n= 78$; $p<0,05$)¹⁸ y As - Zn ($0,173$; $n= 183$; $p<0,05$). La fuerte correlación del par Zn - Pb, indica que la presencia de ambos elementos en el MP_{10} tiene un origen atribuible a una fuente antropogénica común. Las correlaciones entre los pares Zn - Ni, y As - Zn, indican a su vez 2 posibles fuentes adicionales que inciden en la presencia de dichos elementos traza en el MP_{10} . Cabe indicar que en esta zona se presentan fuentes urbanas móviles, residenciales e industriales. En Schuhmacher et al (2003), en los inventarios Cembureau, VDZ y EPER, citados en Cardim De Carvalho (2001), y en Mokrzycki et al (2003) se señalan a los elementos traza As, Pb, Zn y Ni como elementos presentes en el material particulado emitido por los hornos de cemento. Por su parte el consumo de gasolina sin plomo para el transporte de tipo particular en 1999 ya se encontraba en franco descenso, llegando en 2002 a casi nulo (Comisión Nacional de Energía, www.cne.cl). Sin embargo, la flexibilidad en el uso de combustibles, así como la naturaleza diversa de la composición química de éstos, complejiza la identificación de fuentes de combustión específicas, por lo que la interpretación de los resultados obtenidos pasa por identificar tipos de combustibles usados. El análisis de componentes principales con rotación Varimax expuesto en el Cuadro 20, indica 3 factores que explican el 85% de la varianza total. El primer factor que explica el 32% de la varianza total, muestra asociación entre el par Pb – Zn. Un segundo factor que explica un 27% de la varianza total se asocia al Ni, mientras que un tercer factor que explica el 25% de la varianza total se asocia al As. Los tres factores antes citados posiblemente expresen diferentes tipos de combustibles, tales como: combustible tradicional (carbón bituminoso); combustibles alternativos líquidos (CAL); petróleo; neumáticos y petcoke, todos autorizados en distintas proporciones en las mezclas de combustibles usados en los hornos. Con la información disponible respecto a composición de los combustibles y los test de quemas, no es posible asociar con certeza a algún tipo particular de combustible cada uno de los factores obtenidos a través del análisis PCA. Lo anterior se funda en la observación de los resultados de los test de quemas aplicados a los hornos cementeros 8 y 9, donde se aprecia que tanto en un test de quema para el Horno N° 8 con mezcla: CAL al 40%, con 56% crudo y 4% carbón realizado en diciembre de 2004, como en un segundo test de quema para el Horno N° 9 con mezcla: 6% petcoke, 6% neumáticos y 88% carbón realizado en enero de 2007, en ambos se observa la presencia de concentraciones de Zn, Ni y Pb. Sin perjuicio de lo anterior, las concentraciones de As difieren en su magnitud en los test aplicados, siendo más baja en el primer test respecto del segundo test, esto podría sugerir una asociación entre el As y el uso de combustibles sólidos tales como carbón y petcoke, mientras que una segunda hipótesis sugiere la

¹⁷ Para los años 2002, 2003 y 2004 no se cuenta con registros.

¹⁸ Cabe precisar que el Ni solo es medido a partir de 2005.



incidencia de una fuente más lejana como alguna de las dos fundiciones de cobre presentes en la Región de Valparaíso.

Cuadro 20. Análisis de componentes principales,
estación La Calera, período 1999 - 2008

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX			
Elementos	Componentes		
	1	2	3
As	,069	,058	,981
Pb	,876	-,068	,187
Zn	,719	,403	-,119
Ni	,090	,954	,074
Autovalores	1,574	,978	,842
% de la Varianza	32,423	27,023	25,419
Acumulado %	32,423	59,446	84,865

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de MP_{10} en la estación Hijuelas, para mediciones comprendidas entre los años 1999 y 2001 muestra una correlación significativa al 1% para el par As - Zn ($r=0,564$; $n= 75$; $p<0,01$) (ver Cuadro 21). Del análisis de componentes principales con rotación Varimax, se observan 2 factores que explican el 85% de la varianza total. Un primer factor explica el 52% de la varianza total y muestra asociación entre As y Zn; un segundo factor explica el 34% de la varianza total. Los elementos As – Zn podrían atribuirse a material particulado proveniente de horno de cemento. A su vez como indican informes de la CNE, entre 1999 y 2001 aún existía presencia de Pb en los combustibles, lo que junto con la cercanía de la estación monitora a la ruta 5-CH, podría atribuir la presencia de Pb a las fuentes móviles.

Cuadro 21. Análisis de componentes principales,
estación Hijuelas, período 1999 - 2001

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX		
Elementos	Componentes	
	1	2
As	,886	,054
Pb	-,039	,996
Zn	,873	-,129
Autovalores	1,568	,992
% de la Varianza	51,636	33,688
Acumulado %	51,636	85,323



El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de MP₁₀ en la estación Rural 1, de 2005 a 2007, muestra correlaciones significativas al 1% para Zn y Ni ($r=0,497$; $n= 72$; $p<0,01$) y para Pb y Zn ($r= 0,294$; $n= 83$; $p<0,01$) (ver Cuadro 22). Del análisis de componentes principales con rotación Varimax, se observan 3 factores que explican el 92% de la varianza total. Un primer factor explica el 40% de la varianza total y asocia Zn y Ni; un segundo factor explica el 26% de la varianza total; mientras que un tercer factor explica el 25% de la varianza total. Los elementos Zn y Ni pueden atribuirse a las emisiones de los hornos de cemento. La información disponible no permite a la fecha la identificación de la fuente de Pb. Para el As se podría pensar en una fuente fitosanitaria, o bien la incidencia de fuentes antropogénicas distantes tales como fundiciones de cobre.

Cuadro 22. Análisis de componentes principales,
estación Rural 1, período 2005 - 2007

Matriz de Componentes Principales Rotación VARIMAX			
	Componentes		
Elementos	1	2	3
As	-,006	,056	,996
Pb	,079	,985	,059
Zn	,873	,247	-,079
Ni	,919	-,085	,063
Autovalores	1,685	1,078	,898
% de la Varianza	40,305	26,048	25,156
Acumulado %	40,305	66,353	91,509

5.6.3. Estaciones de monitoreo red Chagres

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de MP₁₀ en la estación Catemu, expuesto en el Cuadro 23, muestra una correlación al 5% para Pb y Zn ($r= 0,680$; $n=13$; $p<0,05$), Zn y Cd ($r= 0,611$; $n=11$; $p<0,05$) y para Mo y Cd ($r= 0,605$; $n=11$; $p<0,05$). Del análisis de componentes principales con rotación Varimax, se observan 3 factores que explican el 79% de la varianza total. Un primer factor que explica el 29% de la varianza total, muestra asociación entre Pb y Zn. Un segundo factor que explica el 27% de la varianza total muestra asociación entre Cd, Cu y Mo. El tercer factor denota una asociación entre As y Mn.

Se ha documentado la presencia de Pb, Zn, Cd y Mo en zonas cercanas a fundiciones de cobre. Un estudio del INIA (1992), que comparó muestras superficiales de suelos (0-20 cm) colectadas los años 1983 y 1991 en las inmediaciones de la fundición Ventanas, evidenció, que los suelos se habían enriquecido significativamente para los elementos Pb, Zn, Cd y Cu y que dada la similitud presentada para los modelos de acumulación y distribución espacial, permitió inferir un origen antropogénico para todos ellos, atribuible a las emisiones de una fundición de cobre.



Los resultados del análisis PCA dan cuenta que el proceso de la fundición emite elementos diferentes en etapas distintas, por lo cual aparecen asociados de forma diferente. La asociación Pb y Zn, se puede atribuir a la emisión de polvos fugitivos generados en los procesos de conversión del concentrado de Cobre Morales (2006). La asociación entre Cu, Mo y Cd se puede atribuir a emisiones procedentes de procesos de refinación posteriores, como así a la dispersión de emisiones de partículas de concentrado de cobre desde acopios.

La asociación entre As y Mn, podría atribuirse a polvo resuspendido como se señala en el estudio Mejora de Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la zona de Catemu (UNTEC, 2007) donde se indica que las emisiones anuales de material particulado resuspendido en Catemu producto de tránsito vehicular por calles sin pavimentar corresponden a 163 t/año, otras 12 t/año las constituyen emisiones de material resuspendido de calles con pavimento.

Cuadro 23. Análisis de componentes principales,
estación Catemu, período 2000 - 2007

Matriz de Componentes Principales, Rotación VARIMAX			
Elementos	Componentes		
	1	2	3
As	,222	-,035	-,903
Cd	,575	,604	,304
Cu	-,073	,923	,073
Mn	,229	,383	,759
Mo	,264	,645	,218
Pb	,931	-,096	-,098
Zn	,821	,355	-,010
Autovalores	2,961	1,705	,845
% de la Varianza	29,263	27,356	22,108
Acumulado %	29,263	56,619	78,727

El análisis de correlación de pares aplicado a las muestras de MP_{10} en la estación Lo Campo, expuesto en el Cuadro 24 muestra correlación al 1% para Cu y Cd ($r= 0,811$; $n=12$; $p<0,01$), Zn y Cd ($r= 0,796$; $n=12$; $p<0,01$), Zn y Pb ($r= 0,707$; $n=13$; $p<0,01$) y una correlación al 5% para Mo y Cu ($r=0,600$, $n=12$; $p<0,05$) y para Zn y Cu ($r=0,572$; $n=12$; $p<0,05$). Del análisis de componentes principales con rotación Varimax, se observan 3 factores que explican el 83% de la varianza total. Un primer factor que explica el 36% de la varianza total, presentando asociación entre Pb, Zn y Cd. Un segundo factor que explica el 26% de la varianza total. El tercer factor que explica el 20% de la varianza total.

La asociación que se observa en el primer factor entre Pb, Zn y Cd podría atribuirse a procesos de fundición de cobre. La presencia de Mn, se puede atribuir a la suspensión de suelo de la zona. La presencia de As podría asociarse a su volatilidad en los concentrados o bien a un



origen fitosanitario. De acuerdo a los datos observados no es posible atribuir una fuente única tanto al Mo como al Cu.

Cuadro 24. Análisis de componentes principales,
estación Lo Campo, período 2000 - 2007

Matriz de Componentes Principales, Rotación VARIMAX			
	Componentes		
Elementos	1	2	3
As	,174	,104	,887
Cd	,762	,537	-,202
Cu	,514	,550	-,489
Mn	,045	,913	,154
Mo	,245	,567	-,517
Pb	,901	-,122	,221
Zn	,881	,280	-,029
Autovalores	3,365	1,488	,926
% de la Varianza	36,058	26,412	20,100
Acumulado %	36,058	62,471	82,570



6. EVALUACIÓN DE RIESGO

El Cuadro 25 muestra los niveles de riesgo para la salud de la población y la vegetación, obtenidos a partir de la aplicación del análisis multicriterio mediante las fórmulas 8 y 9 de la sección 4.7, respectivamente. Los mapas de riesgo construidos, permiten apreciar el riesgo relativo asociado a cada sector del área de estudio de acuerdo al tipo de contaminante estudiado.

Cuadro 25. Niveles de riesgo sanitario y ambiental para los contaminantes MP₁₀, SO₂, NO₂ y O₃

ESTACIÓN	NRsp MP ₁₀	NRsp SO ₂	NRv SO ₂	NRsp NO ₂	NRv NO ₂	NRsp O ₃	NRv O ₃
LO CAMPO	3,71	2,94	3,06	S/I	S/I	S/I	S/I
CATEMU	4,02	3,24	3,06	S/I	S/I	S/I	S/I
ROMERAL	S/I	3,19	3,49	S/I	S/I	S/I	S/I
STA MARGARITA Chagres	S/I	3,66	3,96	S/I	S/I	S/I	S/I
LA CALERA	4,21	2,89	2,28	3,49	3,49	3,91	3,31
RURAL 1	3,84	2,76	2,58	3,06	3,36	3,49	3,31
LA CRUZ	3,11	2,64	2,46	S/I	S/I	2,89	3,01
HIJUELAS	S/I	2,28	2,11	2,76	3,06	3,19	3,01
CONCÓN STA MARGARITA	3,66	3,19	2,58	3,19	2,89	3,91	3,61
CONCÓN SUR	3,61	3,01	2,41	S/I	S/I	S/I	S/I
COLMO	3,06	2,76	3,06	3,06	3,84	4,14	4,44
LAS GAVIOTAS	S/I	2,58	2,76	S/I	S/I	S/I	S/I
BOMBEROS	3,89	3,24	2,64	3,89	3,41	3,71	3,41
SAN PEDRO	3,77	3,41	3,24	3,41	3,84	4,19	4,14
LA PALMA (EX-UCV)	3,41	2,94	3,24	3,41	4,02	3,71	4,32
LIMACHE	S/I	2,16	1,56	2,33	2,21	2,94	2,33

S/I: Sin información, dado que no se efectúan mediciones del contaminante



6.1. Niveles de Riesgo asociado a MP_{10}

La Figura 62 muestra que las zonas que presentan mayor riesgo para la salud de la población debido a la presencia de MP_{10} , corresponden a La Calera (4,21) y Catemu (4,02). Por lo tanto corresponderían de acuerdo a la evaluación aplicada, a las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia de incrementos en la mortalidad tanto diaria como prematura, producto de exposiciones a MP_{10} diarias y anuales respectivamente. Se consideran zonas de riesgo intermedio o moderado para los sectores circundantes a las estaciones monitoras Bomberos y San Pedro en Quillota, Rural 1 en La Calera, Santa Margarita y Concón Sur en Concón, y Lo Campo en Panquehue.

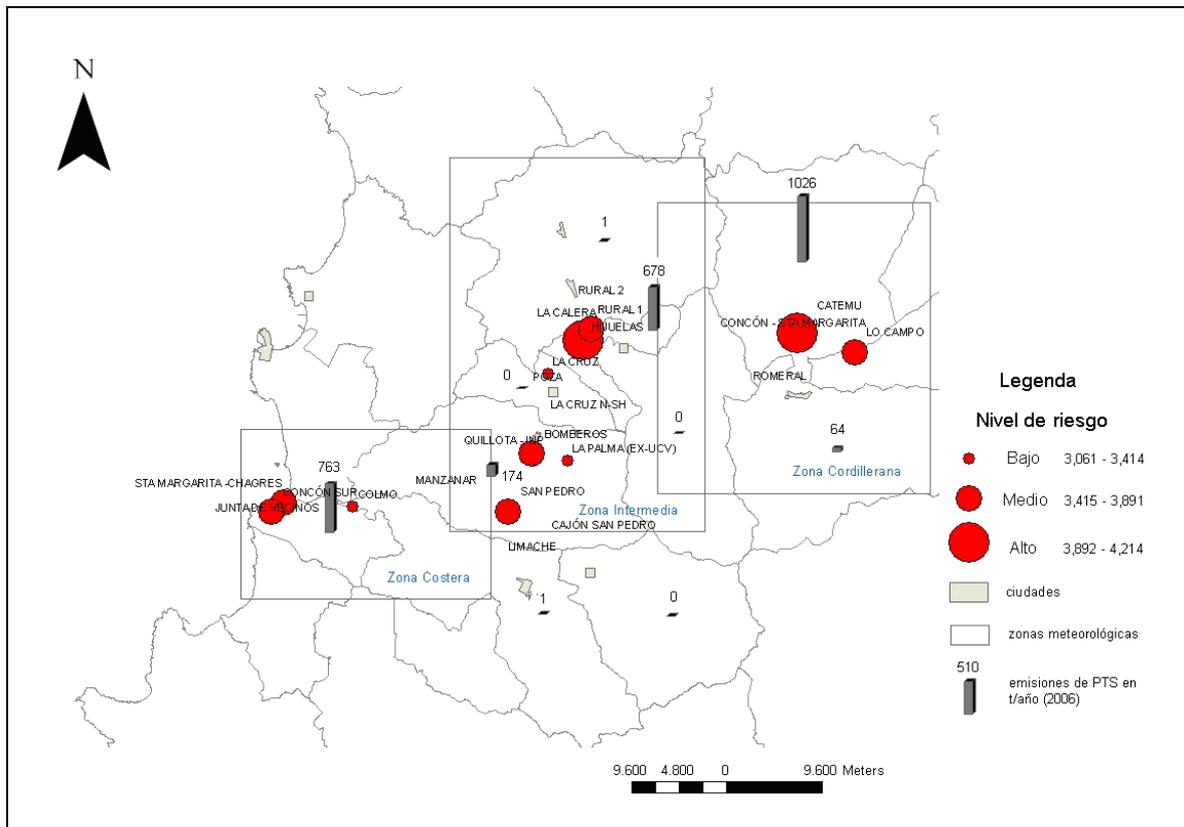


Figura 62. Mapa de riesgo sanitario asociado al material particulado, MP_{10}

6.2. Niveles de riesgo asociado a SO_2

La Figura 63 muestra que las zonas que presentan mayor riesgo para la salud de la población son: Santa Margarita (Chagres) (3,66), San Pedro (3,41), Bomberos (3,24), Catemu (3,24), Romeral (3,19) y Concón (3,19). Por lo tanto existe una mayor probabilidad de ocurrencia de efectos adversos de carácter agudo sobre la población expuesta a este contaminante, particularmente la población de adultos mayores con afecciones respiratorias crónicas.

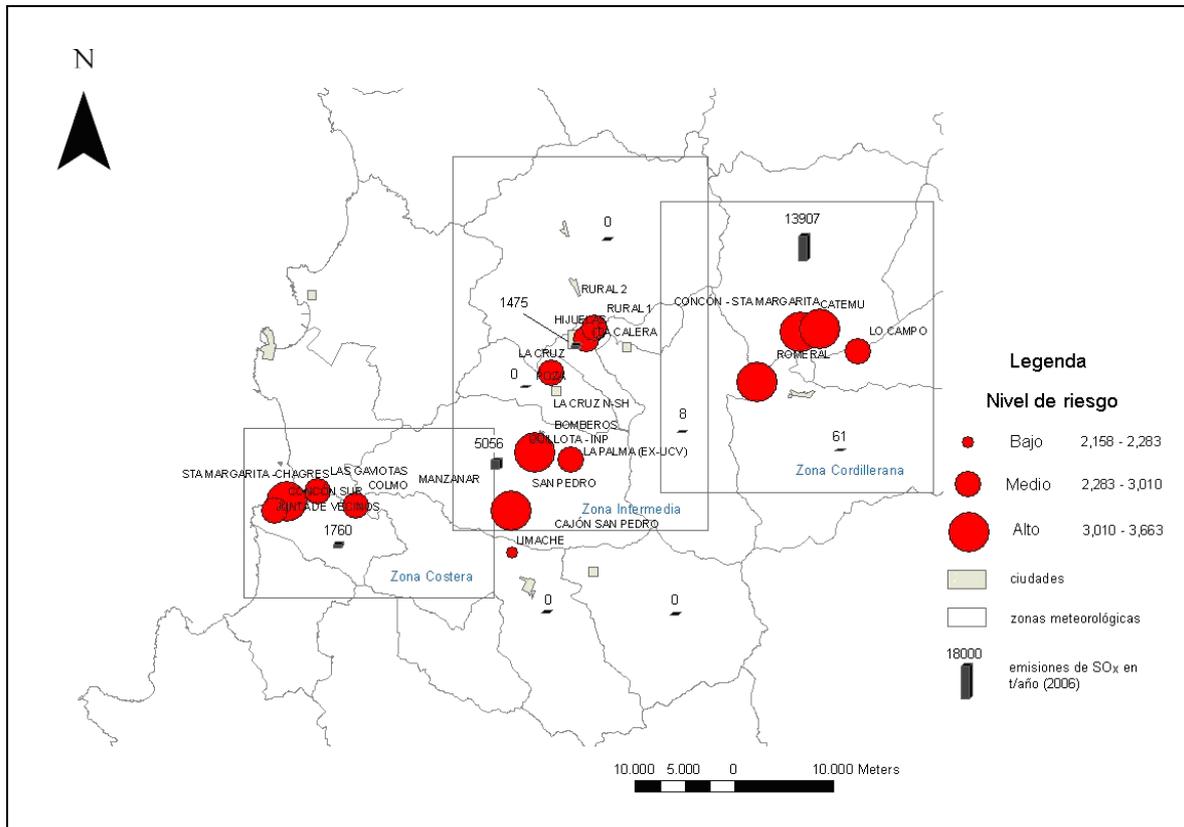


Figura 63. Mapa de riesgo sanitario asociado al dióxido de azufre, SO₂

Con respecto al nivel de riesgo a la vegetación y cultivos la Figura 64 muestra que las zonas circundantes a todas las estaciones de monitoreo de SO₂ en el área de influencia de la fundición Chagres, estos es Santa Margarita (3,96), Romeral (3,49), Catemu (3,06) y Lo Campo (3,06), presentan riesgo alto. En esta zona predominan los cultivos de los paltos, vides, cítricos, nogales y olivos, los cuales podrían evidenciar efectos crónicos tales como clorosis por acumulación de azufre en las hojas, no descartándose efectos agudos en los cultivos de la zona de Santa Margarita en Catemu. Se observan riesgos altos también en La Palma (3,24), San Pedro (3,24) y Colmo (3,06), no obstante en esta zona los principales cultivos expuestos son los paltos, naranjos y limoneros.

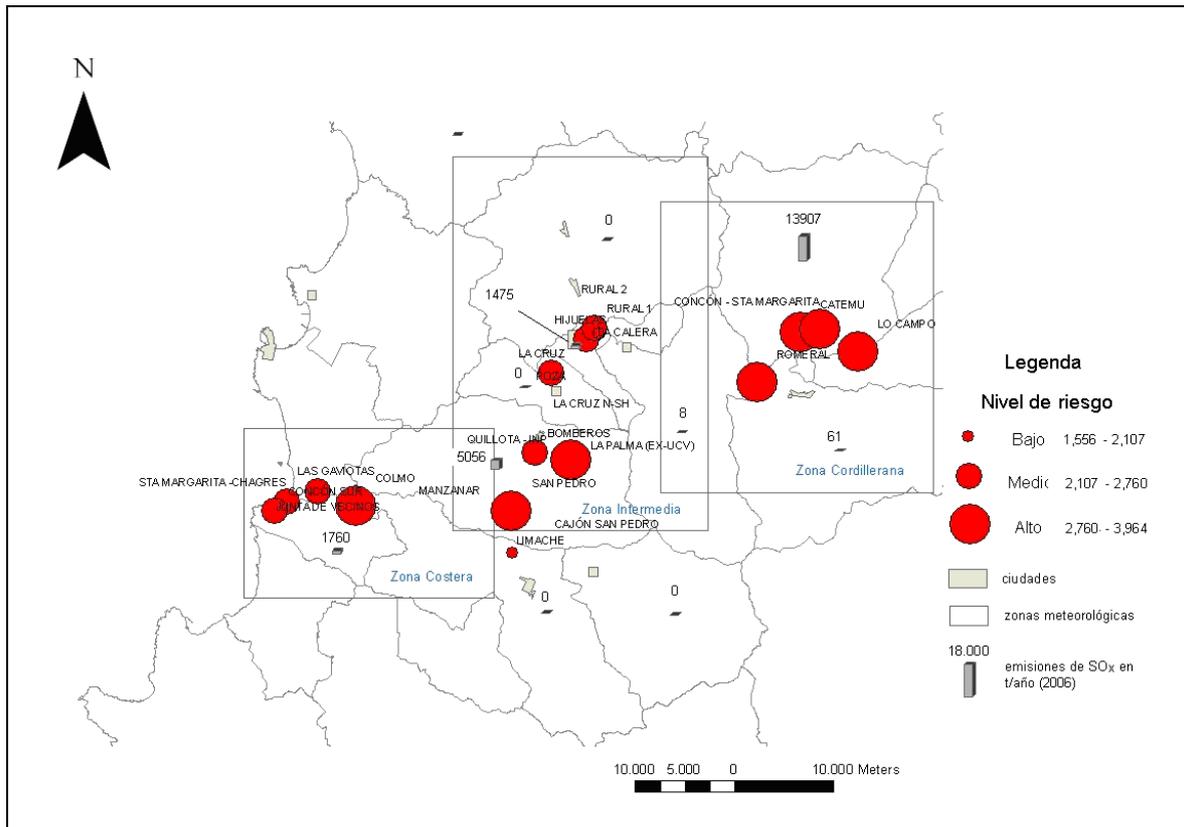


Figura 64. Mapa de riesgo para la vegetación y cultivos asociado al dióxido de azufre, SO₂

6.3. Niveles de riesgo asociado a NO₂

La Figura 65 muestra que el mayor riesgo sanitario se presenta en la zona de Quillota en el sector circundante a las estaciones San Pedro (3,41), Bomberos (3,89) y La Palma (3,41) y en La Calera (3,49). Por lo tanto existe una mayor probabilidad de ocurrencia de efectos adversos de carácter agudo sobre la población expuesta a este contaminante, particularmente la población de adultos mayores con afecciones respiratorias crónicas. El resto de las zonas estudiadas presenta riesgo intermedio.

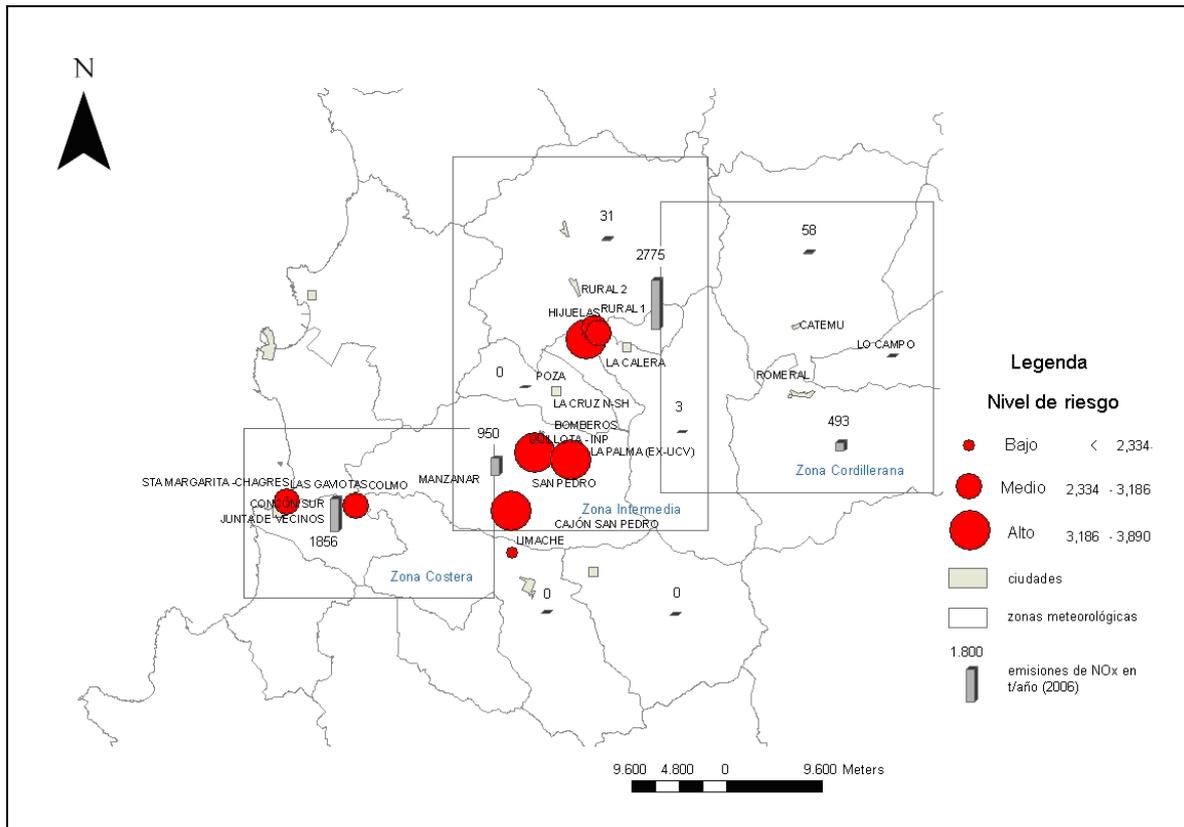


Figura 65. Mapa de riesgo a la salud de la población asociado al Dióxido de Nitrógeno, NO₂

Por su parte las zonas que se encuentran expuestas a un riesgo alto para la vegetación y cultivos corresponden a las zonas rurales de Quillota, particularmente las áreas circundantes a San Pedro (3,84) y La Palma (4,02), además de la zona de Colmo (3,84) en Concón, tal como se muestra en la Figura 66. Estos resultados indican que existe mayor probabilidad de ocurrencia de efectos adversos en cultivos tales como paltos, limoneros y naranjos entre otros, por exposiciones de corto plazo principalmente en la temporada fría del año. En el caso de La Calera califica con riesgo medio debido a la baja presencia agrícola en el sector donde se localiza la estación monitorea.

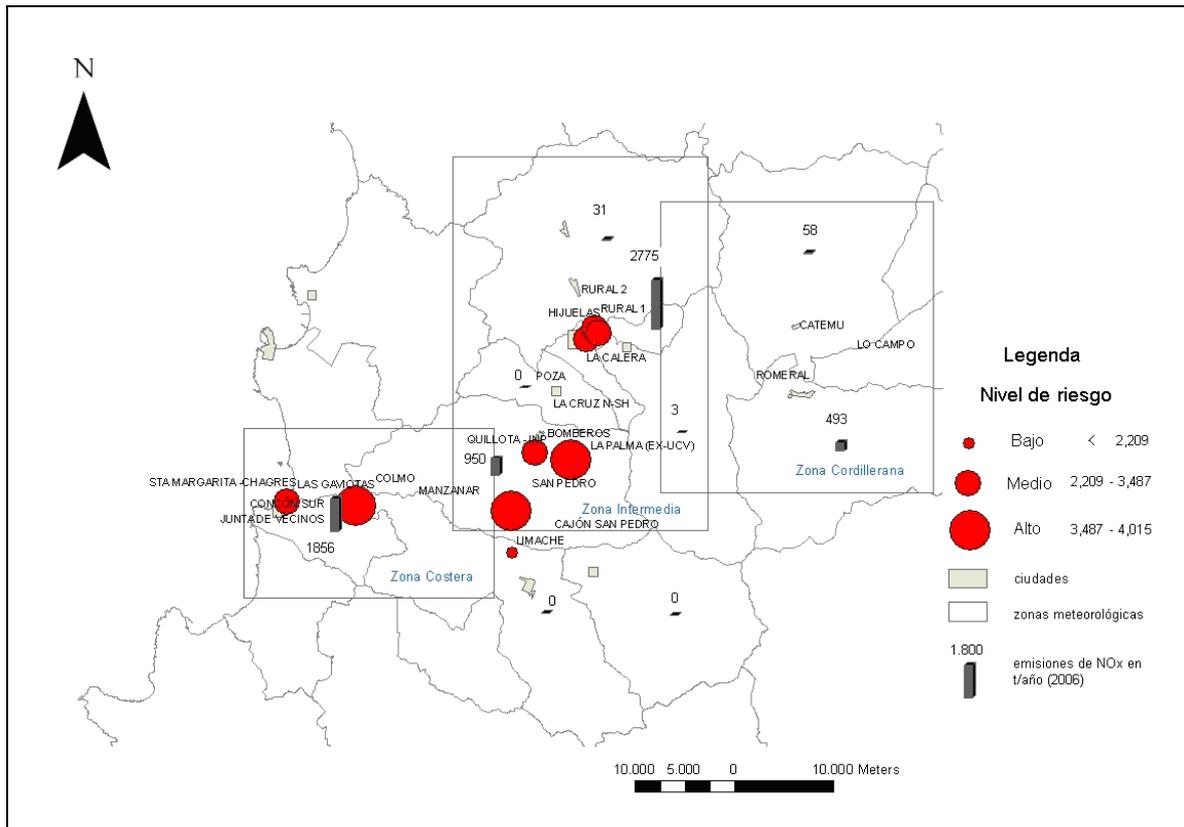


Figura 66. Mapa de riesgo para vegetación y cultivos asociado al Dióxido de Nitrógeno, NO₂

6.4. Niveles de riesgo asociado a O₃

La Figura 67 muestra que la zona de mayor riesgo para la salud de la población por O₃ se presenta en la zona San Pedro en Quillota (4,19), en Colmo (4,14) y Santa Margarita (3,91) en Concón y también en la zona circundante a la estación La Calera (3,91). Por lo que en estas zonas existiría una mayor probabilidad de ocurrencia efectos adversos, tales como irritación ocular, de las mucosas, tos o dificultades para respirar, en las poblaciones sensibles, que habitan en las inmediaciones a dichas estaciones producto de exposiciones agudas principalmente en las estaciones cálidas del año.

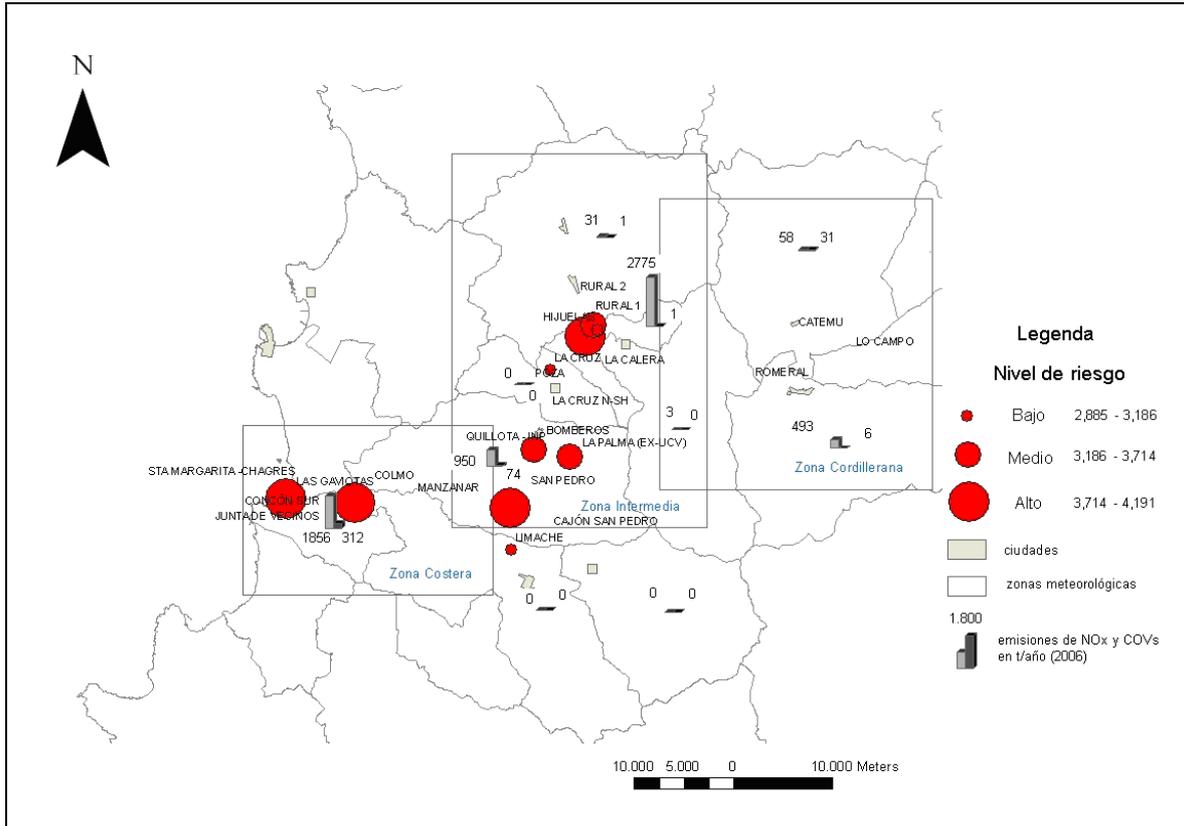


Figura 67. Mapa de riesgo sanitario asociado al ozono, O_3 .

Las zonas que se encuentran expuestas a un riesgo alto para la vegetación y cultivos corresponden a la zona de Colmo (4,44) en Concón, y San Pedro (4,14) y La Palma (4,32) en Quillota, donde se presentaría una mayor probabilidad de ocurrencia de efectos adversos en los cultivos principalmente paltos, limoneros y naranjos, por exposiciones de corto plazo, pudiéndose esperar efectos en el follaje de dichos cultivos. El resto de las zonas del área de estudio presentan riesgo de nivel intermedio, tal como se observa en la Figura 68.

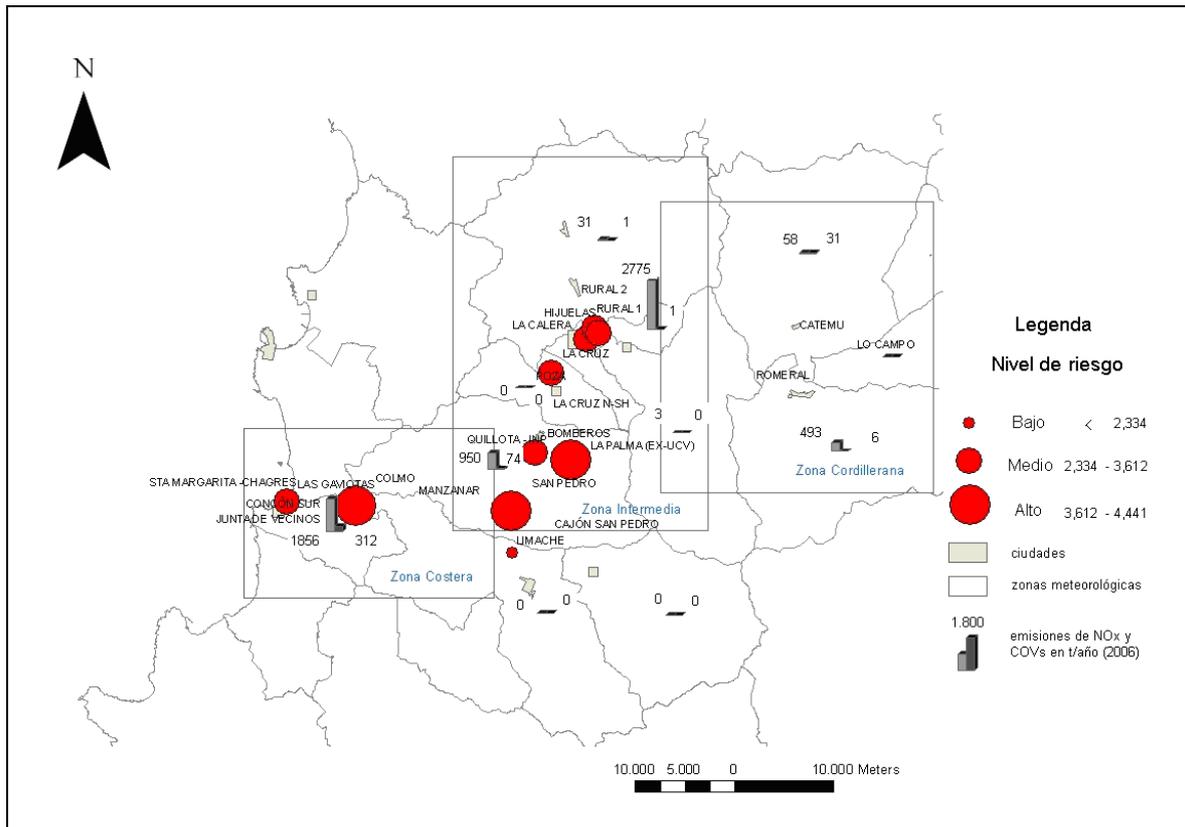


Figura 68. Mapa de riesgo para la vegetación y cultivos asociado al ozono, O₃

En CD anexo se entrega la base de datos donde se calculó los índices de riesgo respectivos.



7. CONCLUSIONES

Las tendencias observadas en el período de una década para los contaminantes estudiados NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, permiten observar tendencias diferenciadas según el tipo de contaminante y la zona específica impactada no así la presencia de un proceso general y extendido de deterioro de la calidad del aire en el área de estudio.

Las zonas que presentan las mayores concentraciones de los contaminantes estudiados NO_2 , O_3 , SO_2 , MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, se localizan en las comunas que presentan las mayores emisiones industriales de NO_x , COV , SO_x y PTS , lo cual vincula dichas fuentes industriales a los niveles de concentración observados para los contaminantes, denotándose un impacto de extensión local. Sin perjuicio de lo anterior, para el caso de los promedios diarios de NO_2 la alta correlación observada entre las diversas estaciones, supone una extensión de la zona de influencia de este contaminante que abarcaría desde Concón hasta La Calera. A su vez las altas concentraciones de O_3 observadas en Limache entre 1999 y 2000, suponen una extensión de este contaminante hacia el este, en dirección a la sub-cuenca del estero de Limache.

La dispersión del MP_{10} depende de la velocidad con que las masas de aire se trasladan por la cuenca, cuyo comportamiento estacional, con mayores concentraciones en invierno, producto de condiciones atmosféricas más estables, dificulta su dispersión en las zonas aledañas a fuentes emisoras. A su vez, la presencia de barreras físicas, preferentemente el relieve, obstaculiza el desplazamiento de las partículas reforzando así su concentración. Tal sería el caso de La Calera cuyas emisiones industriales localizadas en un sector encajonado de la zona intermedia de la cuenca, explicarían el aumento sostenido de la concentración anual de MP_{10} a lo largo de todo el período estudiado, situándose sobre la norma primaria de calidad del aire (DS 59/1998), indicando saturación. Condiciones de relieve similares se observan en Catemu donde las concentraciones de MP_{10} superaron a la norma primaria anual, durante todo el período de estudio, con el consiguiente riesgo en la población sensible de adultos y personas con afecciones respiratorias.

En la zona de Concón no se observaron tendencias ascendentes en la concentración de $\text{MP}_{2.5}$.

La presencia de NO_2 y O_3 en la cuenca se explica principalmente por las emisiones de NO_x y COV_s antropogénicos y biogénicos, y por la radiación solar que junto con inducir reacciones fotoquímicas precursoras de O_3 , incide en el desplazamiento de masas de aire cuya humedad desciende a medida que se interna en la cuenca. La radiación solar favorece la inestabilidad de las masas de aire incrementando la intensidad del viento durante la tarde y durante el verano, por el contrario su ausencia determina tendencias inversas en el desplazamiento e intensidad de las masas de aire.

El cambio de combustible de gas natural a petróleo diesel en las centrales termoeléctricas coincide con un claro incremento en la concentración de NO_2 (1 h) en las zonas vecinas de San Pedro y La Palma, sumado a las condiciones invernales desfavorables para la difusión y dispersión de este



gas, con el consiguiente impacto sobre los cultivos de la zona debido a la menor capacidad de desintoxicación de las plantas a bajas temperaturas. En Concón, si bien no se observan altas concentraciones de NO_2 , la presencia de alta humedad puede favorecer la precipitación ácida de aerosoles húmedos, pudiendo ocasionar impactos sobre el pH del suelo, situación que no es descartable hacia el interior de la cuenca.

El O_3 junto con aumentar por la influencia de la radiación solar, tiende a acumularse con la presencia de COV_s procedentes de las centrales y/o de la refinería de petróleo en Concón; aún cuando se adolece de datos de emisión biogénica, es plausible suponer un aporte de COV_s biogénicos desde las plantaciones de paltos y cítricos, situación que refuerza una acumulación del O_3 principalmente en verano. Esta situación no se observa en la zona urbana de La Calera la cual carece de zonas cultivables.

Importante es el rol que tiene la velocidad, la dirección del viento y el relieve en el transporte y acumulación del O_3 . Las altas concentraciones observadas en las estaciones de San Pedro, La Palma y Cajón San Pedro dan cuenta de ello. No obstante haberse registrado un incremento en las concentraciones de O_3 (8 h) a partir de la puesta en marcha del cambio energético en las centrales, se observa hacia el trienio 2006 – 2008 un claro descenso, este comportamiento puede ser atribuido al incremento de la concentración de NO_2 , el que actuaría como sumidero del O_3 , situación que se observa en La Calera donde las emisiones de NO_x desde los hornos cementeros consumen el O_3 .

No se observan excedencias a la normativa primaria para NO_2 y O_3 , pero si excedencia de los límites secundarios recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

La presencia de SO_2 tiene su origen en las emisiones antropogénicas procedentes principalmente de las fuentes industriales de la zona de estudio. La acumulación del SO_2 depende de diversos factores entre los que se observan la ventilación de la cuenca, la presencia de barreras geomorfológicas y la presencia de humedad. En general, la cuenca se presenta bien ventilada salvo algunos sectores como es el caso del sector Santa Margarita localizado en una zona rural vecina a la fundición Chagres en Catemu. En dicha zona se observa, producto de su localización en las faldas de un sector montañoso flanqueado por dos cuencas bien ventiladas como son la cuenca del Aconcagua y Catemu, una acumulación de SO_2 , hacia la tarde en verano, que puede ser explicada por la disminución de la humedad, por lo que el SO_2 no precipitaría en forma de H_2SO_4 o algún sulfato secundario, tendiendo a acumularse a niveles de riesgo agudo para la población. No obstante, cabe indicar que las concentraciones de SO_2 experimentaron una clara tendencia descendente, producto de las mejoras tecnológicas de abatimiento de emisiones; sin embargo, la presencia de SO_2 y de As en el MP_{10} permite suponer que aún existen emisiones fugitivas o no controladas. En Concón por el contrario, se produce un patrón distinto, atribuible a la presencia de humedad. Es así como la mayor acumulación de SO_2 se produce en las mañanas cuando disminuye la humedad matinal principalmente en los meses fríos, disminuyendo con ello la transformación de este contaminante, lo que explicaría algunas excedencias episódicas al límite secundario de 1 hora durante el período de estudio.



De acuerdo a la alta concentración de Cu observado en el MP₁₀ de las estaciones de Concón, no es posible descartar el aporte de SO₂ desde la refinería de Ventanas, considerando la deriva que experimentan durante la noche los vientos en dirección al mar, para luego en la mañana internarse en la cuenca.

El origen de los elementos traza As, Cd, Cu, Mo, Pb, Zn y Ni, presentes en el MP₁₀ de la cuenca del Aconcagua es principalmente antropogénico exceptuando el Mn que es de origen natural. Las fuentes emisoras de estos elementos traza se sitúan en el área de estudio y corresponden a la Fundición Chagres, Planta Cemento Melón, Complejo Nahuenco San Isidro y Enap. No se descarta en las zonas agrícolas la presencia de As de origen fitosanitario, así como la presencia de Pb desde fuentes móviles. La presencia del As en La Calera pudiera deberse a la influencia de alguna de las fundiciones de cobre.

Las zonas que presentan riesgo alto para la salud de la población son para el caso del NO₂ las localidades de San Pedro y La Palma y las zonas urbanas de Quillota y La Calera. Para el O₃, son las localidades de San Pedro y Colmo y las zonas urbanas de Quillota y La Calera. Para el SO₂, la zona de Chagres, particularmente la zona rural de Santa Margarita, la zona urbana de Catemu, la localidad de San Pedro y la zona urbana de Quillota, además de la zona urbana de Concón. Para el MP₁₀ presentan riesgo alto las zonas urbanas de Catemu y La Calera. La principal población expuesta corresponde a adultos mayores y personas con afecciones respiratorias.

Las concentraciones de As, presentan valores superiores al límite Europeo de 6 ng/m³, en todas las estaciones estudiadas, siendo la zona más impactada por As Lo Campo en Panquehue y la zona urbana de Catemu. A su vez se observaron niveles de Cr superiores al valor recomendado por la OMS de 2,5 ng/m³ en La Calera, Hijuelas y Rural 1.

Las zonas que presentan riesgo alto para la vegetación por NO₂, O₃ y SO₂ son las localidades de San Pedro, La Palma y Colmo. Así mismo presentan riesgo alto por SO₂ las zonas rurales de Santa Margarita, Romeral, Lo Campo y la zona urbana de Catemu. En la zona predominan cultivos de paltos, cítricos y vides, los cuales podrían presentar efectos adversos.

Desde el punto de vista normativo existe una brecha importante entre los límites contemplados en las normas primarias de calidad del aire y los límites recomendados por la OMS. Existe carencia de normas secundarias para aire para NO₂, O₃ y material particulado. Además, no existen normas de calidad primaria para elementos traza. Los resultados obtenidos revelan la necesidad de contar con normas de calidad para As, Cr, Ni, Cd, Zn y Mo.



8. RECOMENDACIONES

- Se debe declarar zonas saturadas y aplicar un plan de descontaminación a La Calera y Catemu, por superación de la norma primaria anual de MP_{10} (DS 59/1998), Paralelamente se propone aplicar medidas, tales como la utilización de barreras sanitarias a través de arborización y el aspirado permanente de calles y fachadas. Estas medidas se recomiendan también para aplicarlas en la zona de Quillota y Concón.
- Dada la reciente publicación de la norma primaria de calidad ambiental para $MP_{2,5}$, (DS 12/2011) la cual entrará en vigencia el 01.01.2012, se debe comenzar a medir el material particulado fino $MP_{2,5}$ priorizando la localización de las estaciones de monitoreo en las estaciones que actualmente miden elementos traza.
- Las centrales termoeléctricas de la zona de Quillota deben privilegiar la generación energética a base de gas natural licuado (GNL) versus la generación a petróleo diesel. Independientemente de ello, todas las centrales termoeléctricas localizadas en la cuenca del Aconcagua deberán implementar las tecnologías de abatimiento necesarias para cumplir con la normas de emisión de partículas, SO_2 y NO_x para fuentes emisoras existentes y nuevas contenidas en el DS 13/2011.
- Si bien las concentraciones de NO_2 en La Calera son menores que en Quillota, las altas emisiones de NO_x desde los hornos de cemento Melón ameritan estudiar la opción de compensar emisiones de futuras ampliaciones, a través de la utilización de tecnologías de abatimiento de NO_x .
- Se debe incentivar en las empresas agrícolas el uso de calefacción a base de gas licuado para el control de heladas, en vez de las quemas agrícolas al aire libre, por razones sanitarias evitando molestias a la comunidad por MP_{10} y NO_x , así como también para el cuidado de los cultivos que podrían verse afectados por la presencia adicional de NO_x .
- La fundición Chagres debe avanzar en el control de las emisiones fugitivas de SO_2 , MP_{10} y elementos traza principalmente As, elemento que presenta niveles elevados en Lo Campo y Catemu.
- La institucionalidad ambiental debe definir normas primarias para elementos traza, tales como As, Cr, Zn, Ni, Cd, Hg, V, Sn en el aire y a su vez normas secundarias para estos elementos en el suelo.
- Se deben establecer regulaciones al contenido de elementos traza en los combustibles tradicionales, alternativos y concentrados de cobre, como complemento a las normas de emisión vigentes para hornos de cemento (DS 45/2007), fundiciones de cobre (DS 165/1999), actualmente en proceso de revisión y la recientemente aprobada norma emisión para centrales termoeléctricas (DS 13/2011).



- Se recomienda estudiar efectos agudos en la salud de la población con ocasión de superación de los $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio horario móvil de SO_2 en la zona rural de Santa Margarita en Catemu y en Concón.
- Se recomienda efectuar estudios de toxicidad crónica a As en los habitantes de la zona de Catemu, Santa Margarita y Lo Campo.
- Se recomienda estudiar la presencia de azufre en las plantaciones y cultivos de la zona rural de Santa Margarita en Catemu influenciada por la fundición Chagres.
- Se recomienda efectuar estudios para determinar el impacto por precipitación ácida en la zona de Concón.
- Se recomienda retomar las mediciones de O_3 y NO_2 en la zona de Limache.
- Desde el punto de vista de la gestión atmosférica, se debe avanzar en robustecer el Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA), como base de datos de acceso público y en tiempo real de las mediciones que efectúan las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.



BIBLIOGRAFÍA

- ASIVA. Caracterización Económica de la Provincia de Quillota. Departamento de Estudios de la Asociación de Empresa de la V región. 2011.
- ATSDR División de Toxicología. Ficha informativa sobre Antimonio. 1995.
- ATSDR División de Toxicología. Ficha informativa sobre Cinc. 2005.
- ATSDR División de Toxicología. Ficha informativa sobre Talio. 1995
- CARDIM De Carvalho. Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento- Aportaciones del análisis de los inventarios de ciclo de vida del cemento. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2001.
- CENMA. Diagnóstico Integral de la Contaminación Atmosférica en la Macrozona Central de Chile. Santiago, CENMA y CONAMA, 2001. 148 p.
- CENMA. Anuario Calidad del Aire 2005. Santiago, CENMA y CONAMA, 2006. pp. 79.
- CONAMA. Reporte 2005-2006 del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, RETC, Santiago, CONAMA, 2008.
- CONAMA. Reporte 2005-2007 del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, RETC, Santiago, CONAMA, 2010.
- CONCENTRACIONES atmosféricas de PTS y su contenido de metales en una zona adyacente a una planta de cemento por García "et al", Interciencia. 27(9): 476-481, 2002.
- CONTAMINACIÓN del Aire Atmosférico por material particulado en una Ciudad Intermedia: El Caso de Chillán (Chile) por Celis, J. "et al". Información Tecnológica. 18(3): 49-58, 2007.
- DALMASSO, A., CANDIA, R., LLERA, J.. La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. Multequina – Instituto argentino de investigación de las zonas áridas, 6: 91-97, 1997.
- DECRETO Supremo Nº 4. CHILE. Establece normas de calidad del aire para material particulado sedimentable en la Cuenca del río Huasco III región, Santiago, Chile, 1992.
- DECRETO Supremo Nº 12. CHILE. Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP2.5, Santiago, Chile, 2011.
- DECRETO Supremo Nº 13. CHILE Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas, Santiago, Chile, 2011.
- DECRETO Supremo Nº 22. CHILE. Establece norma de calidad secundaria de aire para anhídrido sulfuroso (SO₂), Santiago, Chile, 2010.
- DECRETO Supremo Nº 45. CHILE. Norma de Emisión Incineración y Co-incineración, Santiago, Chile, 2007.
- DECRETO Supremo Nº 59. CHILE. Establece norma de calidad primaria para material particulado respirable MP₁₀, en especial de los valores que definen situaciones de emergencia. Ministerio Secretaría General de la Presidencia de la República, Santiago, Chile, 1998.



- DECRETO Supremo N° 61. CHILE. Reglamento de Estaciones de Medición de Contaminantes Atmosféricos, Santiago, Chile, 2008.
- DECRETO Supremo N° 75. CHILE. Modifica norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire contenida en el DS N° 165, Santiago, Chile, 1999.
- DECRETO Supremo N° 112. CHILE. Establece norma primaria de calidad de aire para ozono (O₃), Santiago, Chile, 2002.
- DECRETO Supremo N° 113. CHILE. Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre (SO₂), Santiago, Chile, 2002.
- DECRETO Supremo N° 114. CHILE. Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno (NO₂), Santiago, Chile, 2002.
- DECRETO Supremo N° 136. CHILE. Norma de calidad primaria para plomo en el aire, Santiago, Chile, 2000.
- DECRETO Supremo N° 138. CHILE. Establece obligación de declarar emisiones que indica, Santiago, Chile, 2005.
- DECRETO Supremo N° 165. CHILE. Establece norma de emisión para la regulación del contaminante arsénico emitido al aire, Santiago, Chile, 1999.
- DECRETO Supremo N° 185. CHILE. Reglamenta Funcionamiento de Establecimientos Emisores de Anhídrido Sulfuroso en todo el Territorio de la República, Santiago, Chile, 1991.
- DELGADO Saborit, J.M.. Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. Castellón, España, Departamento de química inorgánica y Orgánica, Universitat Jaume – I, 2004.
- DETERMINACIÓN de línea base nacional de contenido de arsénico en material particulado respirable por Gidhagen “et al”, Santiago, CONAMA., 2000.
- DIRECTIVA 1999/30/CE del Consejo del 22 de abril de 1999 relativa a los valores límite de dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, partículas y plomo en el aire ambiente. CEE, 1999.
- DIRECTIVE 2004/107/EC of de European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. CEE, 2004.
- DONALDSON, K. y MACNEE, W. The Mechanism of lung injury caused by MP₁₀. Issues in Environmental Science and Technology. 10: 21-32, 1998.
- EXAMINATION of pollution trends in Santiago de Chile with cluster analysis of PM₁₀ and Ozone data by Gramsch E. “et al”., Atmospheric environment. 40: 5464-5475, 2006.
- FLORES Rodríguez, J. Contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. En: ALBERT et al (Eds). Introducción a la toxicología ambiental. Metepec, México, Centro Panamericano de Ecología



- Humana y Salud, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud – Organización Mundial de la Salud, 1997. pp. 123-147.
- GALLARDO, L.. 2006. Trazas atmosféricas y su modelación. En: MORALES, R.. (Ed). Contaminación atmosférica urbana: episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago. Editorial Universitaria, 2006. pp. 83 - 104.
 - HANG Thi Nguyen. Evaluation of SO₂ pollution levels between four different types of air quality monitoring stations. *Atmospheric Environment*. 40: 7066–7081, 2006.
 - HARRISON, R. y YIN, J. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on Health?. *The Science of the Total Environment*. 249: 85-101, 2000.
 - HERNÁNDEZ, S.. Proyecto de Investigación para el diagnóstico y vigilancia del impacto por vía Atmosférica de un complejo refinero en Extremadura. Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo, 2007.
 - MASON, B. Principles of geochemistry. 3rd Edition, J. Wiley and Sons, NY, 1966.
 - MATUS, P. y LUCERO, R.. Norma primaria de calidad del aire. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*. 18 (2):, 2002.
 - METAL and sulfate composition of residual oil fly ash determines airway hyperreactivity and lung injury in rats by Gavett, S.H. “et al”., *Environmental Research*. 72:162-172, 1997.
 - MORALES, A.. Caracterización de Polvos de Fundición de Cobre y Establecimiento de Rutas de Procesado. Barcelona, Departamento de ciencia de los materiales e ingeniería metalúrgica, Universidad de Barcelona, 2006.
 - OMS. Guías de Calidad de Aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, actualización mundial 2005. Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud, 2006.
 - PERFIL morfológico y químico elemental de partículas respirables (PM₁₀) en una población del centro de Venezuela por Conde “et al”. *Acta Microscópica*, 16 (1-2): 285-286, 2007.
 - PHYSICAL speciation of arsenic, Mercury, lead, cadmiun and nickel in inhalable atmospheric particles by Fernandez “et al”. *Analytica Chimica Acta*. 524: 33-40, 2004.
 - PRÉNDEZ, M. y CARRASCO, A.. Element distribución of some soils of continental Chile and the Antarctic peninsula. Projection of atmosferic pollution. *Walter, Air and Soil Pollution*, 57-58: 713-722, 1991.
 - RESOLUCIÓN N° 7550. CHILE. Anteproyecto norma de emisión para termoeléctricas, Santiago, Chile, 2009.
 - RESOLUCIÓN N° 1215. CHILE. Normas sanitarias mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica. Ministerio de Salud, Santiago, Chile, junio de 1978.
 - RUDNICK R. L. and GAO, S.. Composition of the Continental Crust. En: RUDNICK, R. L. (Ed.). *The Crust*, 3: 1-64 de H. D. Holland and K. K. Turekian (Eds). *Treatise on Geochemistry*, Elsevier-Pergamon, Oxford 2003.



- RUTHLAND, J. y GARREAUD R.. Meteorological air-pollution potential for Santiago, Chile— towards an objective episode forecasting. *Environmental Monitoring and Assessment*. 34 (3):, 223–244, 1995.
- SAG. Criterios de calidad de suelo agrícola. Servicio Agrícola y Ganadero, Chile, Servicio Agrícola y Ganadero, 2005.
- SCHUHMACHER, M., DOMINGO, J.L., GARRETA, J. Pollutants emitted by a cement plant: Health risks for the population living in the neighbourhood. *Environmental Research*. 95: 198-206, 2003.
- SERPRAM. Campaña de monitoreo de línea de base de suelos y tejidos vegetales. Cemento Melón S.A. y SERPRAM, septiembre, 2004.
- SIZE distributions of ambient air particles and enrichment factor analyses of Metallica elements at Taichung Harbor near the Taiwan Strait by Fang “et al”. *Atmospheric Research*. 81: 320-333, 2006.
- S.V.S. RANA. Environmental Pollution, Health and Toxicology. India, Department of Zoology Ch. Charan Singh University Merrut, 2007. 250 p.
- UNIVERSIDAD DE CHILE. Mejoras a la Metodología de Aplicación de la Norma de Emisión de Arsénico al Aire, V Región Fundación Chagres – Anglo American Chile. UNIVERSIDAD DE CHILE y CONAMA, 2003.
- UNIVERSIDAD Mayor. Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del río Aconcagua. Santiago, SAG y Escuela de Medicina Veterinaria, Facultad de Ciencias Silvoagropecuarias, Universidad Mayor, Mayo, 2005.
- UNTEC. Mejora de Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la zona de Catemu. UNTEC y CONAMA, 2007.
- USE of Alternative fuels in the polish cement industry by Mokrzycki “et al”. *Applied Energy*. 74: 101-111, 2003.
- VEGA de Kuyper. Química Atmosférica II, Contaminación atmosférica y su control. *En Su: Química del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales*. Santiago, Ediciones Universidad Católica de Chile, 2002. pp. 107-134.
- VOUTSA, D y SAMARA, C.. Labile and bioaccessible fractions of heavy metals in the airborne particulate matter from urban and industrial areas. *Atmospheric Environment*. 36: 3583-3590, 2002.
- WHO, Air Quality Guidelines for Europe. Copenhagen, Regional Office for Europe, WHO regional Publications, European Series, N° 91, 2000.



Evaluación de Riesgo Sanitario y Ambiental debido a la presencia atmosférica de contaminantes criterio y no criterio en la cuenca del Aconcagua, Chile.

ANEXOS



Anexo 1. Normas de emisión aplicables al componente aire.

Cuadro 1.1. Normas de emisión aplicables a fuentes fijas de SO₂

Emisión de SO ₂		SO ₂ (mg/Nm ³)	Criterio	Método
Resolución 7750/2009 Anteproyecto norma de emisión centrales termoeléctricas	Termoeléctricas Existentes (por chimenea)	200 30 No Aplica 100	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	Sistema de medición continua de emisiones por chimenea. Equipos con certificación EN 14181 Emisiones de fuentes estacionarias, o similar certificado por USEPA o EPA- Canadá.
	Termoeléctricas Nuevas (por chimenea)	200 10 No Aplica 100	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	
DS 45/2007 Norma de emisión para incineración y co-incineración	Instalaciones de incineración	50	Medición continua de emisiones por chimenea.	Método CH-6C, Determinación de las emisiones de dióxido de azufre desde fuentes fijas (procedimiento con analizador instrumental)
	Instalaciones de co-incineración hornos de cemento y cal.	No Aplica	--	--
	Instalaciones forestales co-incineren biomasa forestal tratada	No Aplica	--	--

Cuadro 1.2. Normas de emisión aplicables a fuentes fijas de NO_x

Emisión de NO ₂		NO _x (mg/Nm ³)	Criterio	Método
Resolución 7750/2009 Anteproyecto norma de emisión centrales termoeléctricas	Termoeléctricas Existentes (por chimenea)	400 200 50 50	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	- Sistema de medición continua de emisiones por chimenea. Equipos con certificación EN 14181 Emisiones de fuentes estacionarias, o similar certificado por USEPA o EPA- Canadá.
	Termoeléctricas Nuevas (por chimenea)	200 120 50 50	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	
DS 45/2007 Norma de emisión para incineración y co-incineración	Instalaciones de incineración	300	Medición continua de emisiones por chimenea.	- Método CH-7E, Determinación de las emisiones de dióxido de nitrógeno desde fuentes fijas (procedimiento con analizador instrumental)
	Instalaciones de co-incineración hornos de cemento y cal.	No Aplica	--	--
	Instalaciones forestales co-incineren biomasa forestal tratada	No Aplica	--	--

Cuadro 1.3. Normas de emisión aplicables a fuentes fijas de MP

Emisión de MP		MP (mg/Nm ³)	Criterio	Método
Resolución 7750/2009 Anteproyecto norma de emisión centrales termoeléctricas	Termoeléctricas Existentes (por chimenea)	50 30 No Aplica No Aplica	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	- Sistema de medición continua de emisiones por chimenea. Equipos con certificación EN 14181 Emisiones de fuentes estacionarias, o similar certificado por USEPA o EPA- Canadá.
	Termoeléctricas Nuevas (por chimenea)	30 30 No Aplica No Aplica	Combustible sólido Combustible Líquido Gas Natural Otros Gases	
DS 45/2007 Norma de emisión para incineración y co-incineración	Instalaciones de incineración	30	Medición continua de emisiones por chimenea.	Método CH-5, Determinación de las emisiones de partículas desde fuentes fijas (procedimiento con analizador instrumental)
	Instalaciones de co-incineración hornos de cemento y cal.	50		



Cuadro 1.4. Normas de emisión aplicables a fuentes fijas de elementos traza

		Elementos traza	mg/m ³	Criterio	Método
Resolución 7750/2009 Anteproyecto norma de emisión centrales termoeléctricas	Termoeléctricas Existentes y nuevas (por chimenea)	Hg	0,1	Uso de carbón y petcoke	Método CH-29, Determinación de metales desde fuentes fijas
		Ni	0,5		
		V	1,0		
DS 45/2007 Norma de emisión para incineración y co-incineración	Instalaciones de incineración	Cd	0,1	Medición 1 vez al año	Método CH-29, Determinación de metales desde fuentes fijas
		Hg	0,1		
		Be	0,1		
		Pb + Zn	1		
		As+Co+Ni+Se+Te	1		
		Sb+Cr+Mn+V	5		
	Instalaciones de co-incineración hornos de cemento y cal.	Cd	0,1	Medición 1 vez al año	
		Hg	0,1		
		Be	0,1		
		Pb	1		
		As+Co+Ni+Se+Te	1		
		Sb+Cr+Mn+V	5		
	Instalaciones forestales co-incineren biomasa forestal tratada	Cd	0,1	Medición 1 vez al año	
		Hg	0,1		
		Be	0,1		
Pb		1			
As+Co+Ni+Se+Te		1			
Sb+Cr+Mn+V		5			
DS 165/1999 Norma de emisión para la regulación del contaminante Arsénico en el aire	Fundición Chagres	As	ton/año	Medición 1 vez al año	
			95		



Anexo 2. Antecedentes sobre las estaciones monitoras y métodos de medición empleados

Cuadro 2.1. Localización de las estaciones meteorológicas en la zona de estudio

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	EMPRESA	COMUNA	Y UTM56	X UTM56	OPERADORA
CHAGRES METEOROLOGÍA	Las Encinas S/N	Chagres (Anglo American)	Catemu	6371481	316512	Instrumentación y Control
MELÓN METEOROLOGÍA	Pedro de Valdivia N°98	Empresas (Melón S.A.)	La Calera	6369730	294110	SERPRAM
CONCÓN STA. MARGARITA (URBANA FIJA)	Cortes N°740 Concón	Refinería Petróleos (ENAP)	Concón	6354247	264784	CIMM T&S
NEHUENCO METEOROLOGÍA	Ruta CH-60 s/n	CT San Isidro (Colbún) CT Neuhenco (Endesa)	Quillota	6353563	282647	SERPRAM

Nota: No fue considerada la Estación Meteorológica Los Vientos en Llay Llay.

Cuadro 2.2. Localización estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la zona de estudio

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	EMPRESA	COMUNA	Y	X	OPERADORA
				UTM56	UTM56	
LO CAMPO	Héroes de la Concepción s/n	Chagres Anglo American	Panquehue	6369529	322275	Instrumentación y Control
CATEMU	Las Encinas S/N		Catemu	6371481	316512	
ROMERAL	Camino Romeral S/N		Hijuelas	6366428	312181	
SANTA MARGARITA- CHAGRES	Camino San Carlos S/N		Catemu	6371812	318469	
LA CALERA	Aldunate N°550	Empresas Melón S.A.	La Calera	6370730	294940	SERPRAM
RURAL 1	Ruta 5 S/N		La Calera	6371858	295815	
LA CRUZ	El Molina N°115		La Cruz	6367285	291464	
HIJUELAS	*		Hijuelas	6371420	296210	
RURAL 2	Camino Público S/N		La Cruz	6375103	294511	
POZA	Sector Poza Cristalina		La Cruz	6366322	290086	
CONCÓN STA. MARGARITA ¹⁹	Cortes N°740 Concón	Refinería Petróleos ENAP	Concón	6354247	264784	CIMM T&S
CONCÓN SUR ²⁰	Los Navegantes N° 563 Concón		Concón	6353317	263631	
CONCÓN SUR (JUNTA DE VECINOS)	Calle El Jardín Poniente N°7, Población Las Gaviotas, Concón		Concón	6353055	263848	
COLMO	Camino Colmo. Parcela N°15		Concón	6353859	271796	
LAS GAVIOTAS	Parcela N°13 Las Gaviota		Concón	6355336	267940	
BOMBEROS	Calle Yungay esquina calle	San Isidro – Neuhenco	Quillota	6359202	289818	SERPRAM
SAN PEDRO	Santa Rosa N°39, San Pedro		Quillota	6353393	287422	
LA PALMA (EX-UCV)	Escuela Agronomía UCV		Quillota	6358533	293403	
QUILLOTA –INP	Maipú 526 (actual IPS)		Quillota	6359867	289259	
CAJÓN SAN PEDRO	*		Quillota	6351320	291870	
LIMACHE	*		Limache	6349100	287500	
LA CRUZ ²¹	Av. Santa Cruz 503, Localidad de La Cruz		La Cruz	6363531	291759	
MANZANAR*	Camino Viejo Manzanar S/N		Quillota	6355829	278154	

¹⁹ Estación Santa Margarita, funcionó hasta Enero de 2000 en Santa Margarita 950 Concón, trasladándose a partir de febrero de 2000 a Cortes N°740 Concón.

²⁰ Marzo de 2006 cambia de localización y pasa a llamarse Estación Junta de Vecinos.

* No se dispone de información

²¹ Inicia sus mediciones el 1º de enero de 2008.



Cuadro 2.3. Métodos de medición de gases y partículas

ESTACIÓN	RESPALDO LEGAL	EMPRESA	MP-10		SO ₂		O ₃		NO ₂		MP-2.5	
			Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia
CONCON URBANA FIJA.	SSVQ N° 306 28 enero 2004- SSVQ N° 0207 SAG 408 23 julio 2002 - SSVQ N° 50 SAG N° 0037 31 enero 2000	ENAP (CONCON)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de Absorción Ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Quimioluminiscencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora	Gravimetría de Bajo Volúmen	Registro continuo, promedio de cada hora
CONCON SUR (marzo 2006 (trasladada a Junta de Vecinos).	SSVQ N° 306 28 enero 2004- SSVQ N° 0207 SAG 408 23 julio 2002 - SSVQ N° 50 SAG N° 0037 31 enero 2000	ENAP (CONCON)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
COLMO.	SSVQ N° 306 28 enero 2004- SSVQ N° 0207 SAG 408 23 julio 2002 - SSVQ N° 50 SAG N° 0037 31 enero 2000	ENAP (CONCON)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de absorción ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Quimioluminiscencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora		
LAS GAVIOTAS.	SSVQ N° 306 28 enero 2004- SSVQ N° 0207 SAG 408 23 julio 2002 - SSVQ N° 50 SAG N° 0037 31 enero 2000	ENAP (CONCON)			Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
JUNTA DE VECINOS.	SSVQ N° 306 28 enero 2004- SSVQ N° 0207 SAG 408 23 julio 2002 - SSVQ N° 50 SAG N° 0037 31 enero 2000	ENAP (CONCON)	Gravimetría High Volume	Cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
CUERPO DE BOMBEROS DE QUILLOTA	SSVQ N° 307 28 enero 2004	NEHUENCO - SAN ISIDRO (QUILLOTA)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, todos los días (Hi - vol). A partir de 2005 registro continuo, atenuación beta	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
SAN PEDRO	SSVQ N° 307 28 enero 2004	NEHUENCO - SAN ISIDRO (QUILLOTA)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, todos los días (Hi - vol). A partir de 2005 registro continuo, atenuación beta	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de absorción ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Quimioluminiscencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora		
LA PALMA (EX UCV)	SSVQ N° 307 28 enero 2004	NEHUENCO - SAN ISIDRO (QUILLOTA)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, todos los días (Hi - vol). A partir de 2005 registro continuo, atenuación beta	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de absorción ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Quimioluminiscencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora		



Cuadro 2.3. Métodos de medición de gases y partículas (continuación)

ESTACIÓN	RESPALDO LEGAL	EMPRESA	MP-10		SO2		O3		NO2		MP-2.5	
			Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia	Método	Frecuencia
LA CALERA.	SSVQ N° 52 31 Enero 2000 SAG N° 0039 - SSVQ N° 309 28 Enero 2004	EMPRESAS MELÓN S.A. (LA CALERA)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora			Quimioluminis cencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora		
RURAL 1.	SSVQ N° 52 31 Enero 2000 SAG N° 0039 - SSVQ N° 309 28 Enero 2004	EMPRESAS MELÓN S.A. (LA CALERA)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de absorción ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Quimioluminis cencia en fase gaseosa	Registro continuo, promedio de cada hora		
LA CRUZ.	SSVQ N° 52 31 Enero 2000 SAG N° 0039 - SSVQ N° 309 28 Enero 2004	EMPRESAS MELÓN S.A. (LA CRUZ)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora	Fotometría de absorción ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora				
LO CAMPO.	Res. 480/2002 SS Aconcagua	CHAGRES ANGLOAMERI CAN (PANQUEHUE)	Gravimetría High Volume	Registro continuo, promedio de cada hora	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
CATEMU.	Res. 480/2002 SS Aconcagua	CHAGRES ANGLOAMERI CAN (CATEMU)	Gravimetría High Volume	Continuo durante 24 horas, cada tres días	Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
ROMERAL.	Rural	CHAGRES ANGLOAMERI CAN (HIJUELAS)			Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						
SANTA MARGARITA.	Rural	CHAGRES ANGLOAMERI CAN (CATEMU)			Fluorescencia ultravioleta	Registro continuo, promedio de cada hora						



Cuadro 2.4. Parámetros medidos en las estaciones meteorológicas en la zona de estudio

ESTACIÓN	FRECUENCIA	VELOCIDAD VIENTO	DIR. VIENTO	Tº	RAD. SOLAR	HUMEDAD RELATIVA	PRECIPITACIÓN
CHAGRES METEOROLOGÍA	Continuo	X	X				
MELÓN METEOROLOGÍA	Continuo	X	X	X	X	X	
CONCÓN – SANTA MARGARITA (URBANA FIJA)	Continuo	X	X	X	X	X	X
NEHUENCO METEOROLOGÍA	Continuo	X	X	X	X	X	

Cuadro 2.5. Análisis de filtros de MP₁₀ estaciones Catemu y Lo Campo

Elemento	Técnica aplicada	Límite detección ng/m ³
Arsénico	Espectrometría de Absorción Atómica	*
Cadmio	Espectrometría de Absorción Atómica	1
Cobre	Espectrometría de Absorción Atómica	*
Manganeso	Espectrometría de Absorción Atómica	*
Mercurio	Espectrometría de Absorción Atómica	1; 0,3**
Molibdeno	Espectrometría de Absorción Atómica	1
Plomo	Espectrometría de Absorción Atómica	*
Zinc	Espectrometría de Absorción Atómica	*

* No se dispone del Límite de detección.

** Los datos estudiados indican estos 2 límites de detección.

Cuadro 2.6. Análisis de filtros de MP₁₀ estaciones Concón, Concón Sur y Colmo

Elemento	Técnica aplicada	Límite detección ng/m ³
Arsénico	Espectrometría de Absorción Atómica	1; 0,6
Cadmio	Espectrometría de Absorción Atómica	0,6
Cobre	Espectrometría de Absorción Atómica	*
Plomo	Espectrometría de Absorción Atómica	9
Níquel	Espectrometría de Absorción Atómica	3
Vanadio	Espectrometría de Absorción Atómica	60

* No se dispone del Límite de detección

Cuadro 2.7. Análisis de filtros de MP₁₀ estaciones Hijuelas, La Calera y Rural 1

Elemento	Técnica aplicada	Límites detección ng/m ³
Arsénico	Espectroscopía de emisión de plasma	3,6; 0,6
Cadmio	Espectroscopía de emisión de plasma	3; 1; 0,6
Mercurio	Determination of metals emissions from stationary sources 2000	1; 0,6
Plomo	Espectroscopía de emisión de plasma	3; 1
Zinc	Espectroscopía de emisión de plasma	30; 0,6
Antimonio	Espectroscopía de emisión de plasma	1; 0,6
Talio	Espectroscopía de emisión de plasma	3; 0,6
Níquel	Espectroscopía de emisión de plasma	0,6; 1,8
Vanadio	Espectroscopía de emisión de plasma	0,6
Cromo	Espectroscopía de emisión de plasma	12; 3; 0,6



Cuadro 2.8. Estaciones de monitoreo de la zona de estudio.



(a) Estación Monitora Con-Con Urbana Fija (ENAP)



(b) Estación Monitora Con-Con Sur Junta de Vecinos Las Gaviotas (ENAP)



(c) Estación Monitora Colmo (ENAP)



(d) Estación Monitora San Pedro, Quillota (N-SH)



(e) Estación Monitora Las Gaviotas (N-SH)



(f) Estación Monitora Bomberos de Quillota (N-SH)



Cuadro 2.8. Estaciones de monitoreo de la zona de estudio (continuación)



(g) Estación La Palma, Quillota (N-SH)



(h) Estación Monitora La Calera (Melón)



(i) Estación Monitora Rural 1, La Calera (Melón)



(j) Estación Monitora La Cruz (Melón)



Cuadro 2.8. Estaciones de monitoreo de la zona de estudio (continuación II)



(k) Estación Monitora Lo Campo (Chagres)



(l) Estación Monitora Santa Margarita (Chagres)



(m) Estación Monitora Romeral (Chagres)



(n) Estación Monitora Catemu (Chagres)



Anexo 3. Períodos de medición evaluados en el área de estudio

Cuadro 3.1. Registros de NO₂ evaluados

		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
NEHUENCO-SAN ISIDRO	LA PALMA								FEB a DIC	ENE a DIC			
	BOMBEROS		ENE a DIC								ENE a DIC (Excepto ABR, JUN y JUL)		
	SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE a DIC										
	CAJÓN SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE a DIC										
	QUILLOTA – INP	OCT a DIC	ENE a DIC										
	UCV		FEB a JUL	NOV a DIC	ENE a DIC				ENE				
	LIMACHE		AGO a DIC	ENE a OCT									
ENAP	CON - CON STA. MARGARITA						ENE a DIC					ENE a JUN (Excepto MAR)	
	COLMO						ENE a DIC					ENE a JUN (Excepto Marzo)	
MELON	LA CALERA		JUN a NOV	ENE a DIC							ENE a DIC (Excepto JUN y AGO)		ENE a JUN
	RURAL 1					ABR a DIC	ENE a DIC				ENE a DIC (Excepto JUN y OCT)		ENE a JUN
	HIJUELAS		JUN a DIC	ENE a DIC		ENE a MAR							



Cuadro 3.2. Registros de O₃ evaluados

		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
SAN ISIDRO	LA PALMA								FEB a DIC	ENE a DIC			
	BOMBEROS		FEB a DIC	ENE a DIC					ENE a DIC	ENE a DIC	ENE a DIC (excepto ABR, JUN, JUL)		
	SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE a DIC										
	CAJÓN SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE										
	QUILLOTA - INP	OCT a DIC	ENE										
	UCV		FEB a JUL	NOV y DIC	ENE a DIC				ENE				
ENAP	LIMACHE		AGO a DIC	ENE a OCT									
	CONCON STA. MARGARITA						ENE a DIC				ENE a JUN (excepto MAR)		
	COLMO						ENE a DIC				ENE a JUN (excepto MAR)		
	LA CALERA								OCT a DIC	ENE a DIC	ENE a DIC (excepto JUN y OCT)	ENE a JUN	
MELON	LA CRUZ						DIC	ENE a DIC		ENE a DIC (excepto JUN y OCT)		ENE a JUN	
	RURAL1					ABR a DIC	ENE a DIC			ENE a DIC (excepto JUN y OCT)		ENE a JUN	
	HIJUELAS		JUN a DIC	ENE a DIC		ENE a MAR							



Cuadro 3.3. Registros de SO₂ evaluados

		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
NEHUENCO-SAN ISIDRO	LA PALMA								ENE a DIC	ENE a DIC, excepto ABRIL	ENE a DIC	
	BOMBEROS		ENE a DIC	ENE a OCT				MAY a JUN; SEP a DIC	ENE a DIC	ENE a DIC, excepto ABRIL	ENE a DIC	
	SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE a DIC	ENE a OCT				MAR a JUN; SEP a DIC	ENE a DIC	ENE-FEB; MAY a DIC	ENE a DIC	
	CAJÓN SAN PEDRO	OCT a DIC	ENE									
	QUILLOTA - INP UCV	OCT a DIC	FEB									
			FEB a JUL					SEP a DIC				
	LIMACHE		AGO a DIC	ENE a OCT								
ENAP	CONCON STA. MARGARITA		ENE a DIC									
	CONCON SUR					MAYO a DIC	ENE A DIC					
	COLMO					MAYO a DIC	ENE A DIC					
	LAS GAVIOTAS					MAYO a DIC	ENE A DIC					
CHAGRES	LO CAMPO		ENE a DIC									
	CATEMU		ENE a DIC									
	ROMERAL		ENE a DIC									
	SANTA MARGARITA		ENE a DIC									
MELÓN	LA CALERA			JUN a DIC	ENE a DIC						ENE a DIC (falta JUN y OCT)	ENE a JUN
	LA CRUZ						DIC	ENE A DIC			ENE a DIC (falta JUN y OCT)	ENE a JUN
	RURAL 1					ABRIL a DIC	ENE A DIC	ENE A DIC			ENE a DIC (falta JUN y OCT)	ENE a JUN
	RURAL 2						ABRIL a DIC					
	HIJUELAS		JUN a DIC	ENE A DIC		ENE a MAR						
	POZA				ABRIL a JUN	ENE a MAYO						



Cuadro 3.4. Registros de MP₁₀ evaluados

		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
NEHUENCO-SAN ISIDRO	LA PALMA								Continuo ENE a DIC			
	BOMBEROS		Discontinuo FEB a DIC	Discontinuo ENE a OCT				Continuo MAY a JUN; SEP a DIC	Continuo ENE a DIC, excepto ABRIL 2006)			
	SAN PEDRO	Discontinuo OCT a DIC	Discontinuo ENE a DIC	Discontinuo ENE a OCT				Continuo MAY a JUN; SEP a DIC	Continuo ENE a DIC, excepto MAR y ABRIL 2006			
	CAJÓN SAN PEDRO	Discontinuo OCT a DIC	Discontinuo ENE									
	QUILLOTA -INP	Discontinuo OCT a DIC	Discontinuo ENE									
	UCV		Discontinuo FEB A JUN					Continuo SEP a DIC				
	LIMACHE		Discontinuo SEP a DIC	Discontinuo ENE a SEP								
ENAP	CON - CON STA. MARGARITA		Discontinuo ENE a DIC								Discontinuo ENE a JUN excepto MAR	
	CON - CON SUR					Discontinuo MAY a DIC	Discontinuo ENE a DIC					
	COLMO					Discontinuo MAY a DIC	Discontinuo ENE a DIC					
	LAS GAVIOTAS											
CHAGR ES	LO CAMPO			Discontinuo AGO a DIC	Discontinuo ENE a DIC							
	CATEMU			Discontinuo AGO a DIC	Discontinuo ENE a DIC							
MELON	LA CALERA		Discontinuo JUN a NOV	Discontinuo ENE a DIC							Discontinuo ENE a JUN	
	LA CRUZ						Discontinuo DIC	Discontinuo ENE a DIC			Discontinuo ENE a JUN	
	RURAL 1					Discontinuo ABRIL a DIC	Discontinuo ENE a DIC				Discontinuo ENE a JUN	
	RURAL 2						Discontinuo ABRIL a DIC					
	HIJUELAS		Discontinuo JUN a NOV	Discontinuo ENE a DIC		Discontinuo ENE a MAR						
	POZA			Discontinuo ABRIL a DIC	Discontinuo ENE a DIC	Discontinuo ENE a MAY						



UNIVERSIDAD DE CHILE
Magister en Gestión y Planificación Ambiental